

**PRINSIP KESEIMBANGAN ENERGI
PADA PREDIKSI KETANGGUHAN RETAK KRITIS (K_{IC})
DAN *FRACTURE RESISTANCE* KRITIS (J_{IC}) BAJA AISI 304
DI DAERAH SAMBUNGAN LAS**

DISERTASI

PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN
MINAT MATERIAL MANUFAKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Doktor



BAMBANG RIYANTA
NIM. 137060200111009

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
M A L A N G
2017**

DISERTASI

PRINSIP KESEIMBANGAN ENERGI PADA PREDIKSI KETANGGUHAN RETAK KRITIS (K_{IC}) DAN *FRACTURE RESISTANCE* KRITIS (J_{IC}) BAJA AISI 304 DI DAERAH SAMBUNGAN LAS

BAMBANG RIYANTA

NIM. 137060200111009

Telah dipertahankan di depan penguji
pada tanggal 20 Desember 2017
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing Utama

Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng., Ph.D

Pembimbing Pendamping I

Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, S.T., M.Eng

Pembimbing Pendamping I

Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, S.T., M.T

Malang, 20 Desember 2017

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Ketua Program Doktor Teknik Mesin

Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng., Ph.D
NIP. 19590703 198303 1 002

JUDUL DISERTASI

PRINSIP KESEIMBANGAN ENERGI
PADA PREDIKSI KETANGGUHAN RETAK KRITIS (K_{IC})
DAN *FRACTURE RESISTANCE* KRITIS (J_{IC})
BAJA AISI 304 DI DAERAH SAMBUNGAN LAS

Nama Mahaiswa : **BAMBANG RIYANTA**
NIM : 137060200111009
Program Studi : PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN
Minat : MATERIAL MANUFAKTUR

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng.,Ph.D
Anggota : Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, S.T.,M.Eng.
Anggota : Dr. Eng. Moch.Agus Choiron, S.T.,M.T.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko M.Eng.Sc.
Dosen Penguji 2 : Prof. Ir. Agus Suprpto,MSc.PhD
Tanggal Ujian : 20 Desember 2017
SK Penguji :

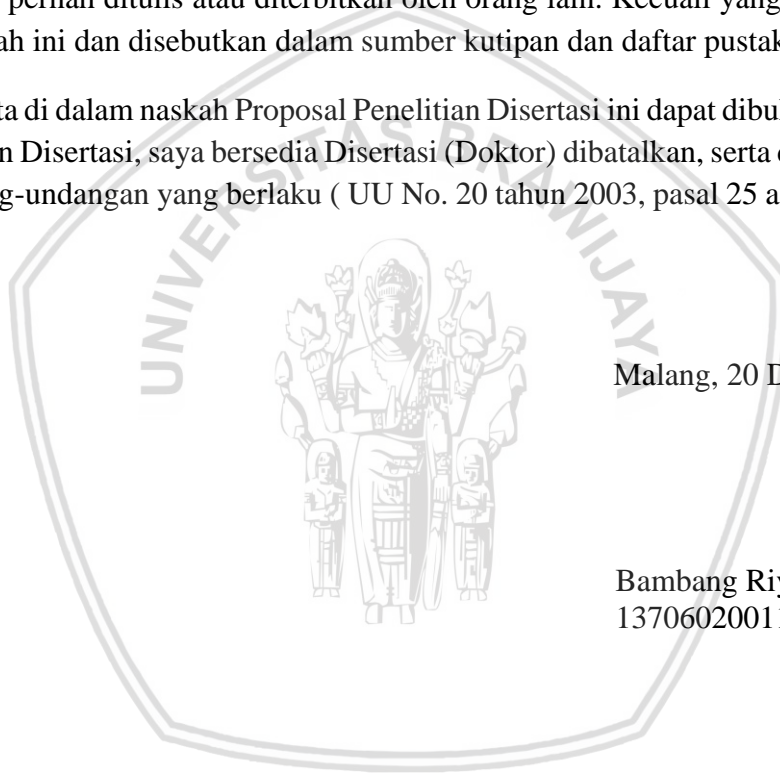
**PERNYATAAN ORISINALITAS
PROPOSAL PENELITIAN DISERTASI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Proposal Penelitian Disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain. Kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka

Apabila ternyata di dalam naskah Proposal Penelitian Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan Disertasi, saya bersedia Disertasi (Doktor) dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 20 Desember 2017

Bambang Riyanta
137060200111009



SERTIFIKASI BEBAS PLAGIASI



LEMBAR PERUNTUKAN

Teriring ucapan terima kasih kepada :

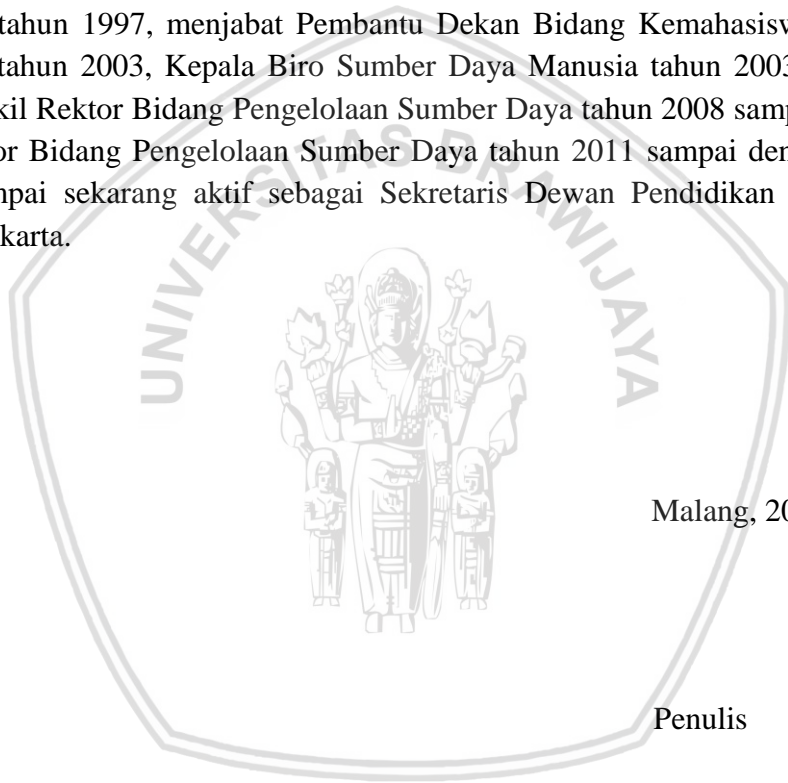
1. Ibu Rahayu Sugeng, Ibunda tersayang
2. Bapak alm. Sugeng Atmohadiminarsa, ayahnda tersayang
3. Buya D Natapermana, Papa mertua tersayang
4. Umi Nur'aini Harahap, Mama mertua tersayang
5. Anna Deliya Rosa, Istri tercinta, wanita istimewa yang telah memberikan dukungan dan perhatian dalam penyelesaian tugas ini
6. Anak-anakku yang selalu menjadi penyejuk hati : Alvy Aqiila Qushoyyi Atmadinata, Zaky Atsal Faid Atmadinata dan Mahira Hafiy Qisya Atmadinata
7. Alm.Mas Said Ismurizal, mas ipar tersayang yang selalu memberikan perhatian dan dukungan.
8. Mas-mas,mbak-mbak dan adik tersayang : Widodo, Lestari, Juarini, Sulastri, Bambang Riyadi, Risdiyanto, Eni Setyowati, Bambang Hartono, alm. Agus Yumantoro, Chimayatus Sholichah, Weni Kurdanti.
9. Abang-abang, Kakak-kakak dan adik-adik tersayang : Dewi Alam Sari, M. Ilham Kusuma Dhani, Bambang Eko Sumantri, Ahmad Surya Negara, Rakhmad Dharma Putra, Yenny Budi Ayu, Muslikh Tejasukmana, Gunawan Eko Nusantara, Nursafrina Br.PA,

LEMBAR RIWAYAT HIDUP

Bambang Riyanta, Yogyakarta 24 Januari 1971 anak dari ayah Sugeng Atmohadimmarso dan Ibu Rahayu, SD sampai Magister di Kota Yogyakarta. Lulus SMA Negeri I Yogyakarta tahun 1989, lulus Program Sarjana Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada tahun 1995, lulus Program Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada tahun 2000. Pengalaman kerja sebagai Kepala Laboratorium Komputer Fakultas Teknik tahun 1996 sampai dengan tahun 1997, menjabat Pembantu Dekan Bidang Kemahasiswaan tahun 2000 sampai dengan tahun 2003, Kepala Biro Sumber Daya Manusia tahun 2003 sampai dengan tahun 2008, Wakil Rektor Bidang Pengelolaan Sumber Daya tahun 2008 sampai dengan 2011, Staff Ahli Rektor Bidang Pengelolaan Sumber Daya tahun 2011 sampai dengan 2013. Sejak tahun 2011 sampai sekarang aktif sebagai Sekretaris Dewan Pendidikan Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Malang, 20 Desember 2017

Penulis



LEMBAR UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih sedalam-dalamnya atas bimbingan, saran dan dukungan yang terhormat :

1. Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng., Ph.D selaku promotor utama
2. Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, S.T., M.Eng. selaku promotor kedua
3. Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, S.T., M.T. selaku promotor ketiga
4. Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko M.Eng.Sc. sebagai dosen penguji pertama
5. Prof. Ir. Agus Suprpto, MSc. PhD sebagai dosen penguji kedua
6. Rektor Universitas Brawijaya Malang
7. Direktur Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya Malang
8. Ketua Program Studi Program Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya
9. Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
10. Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
11. Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
12. Direktorat Pendidikan Tinggi Kemenristek Pendidikan Tinggi Republik Indonesia

RINGKASAN

Bambang Riyanta, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2017, Prinsip Keseimbangan Energi pada Prediksi Ketangguhan Retak Kritis (K_{IC}) dan *Fracture Resistance* Kritis (J_{IC}) Baja AISI 304 di Daerah Sambungan Las, Dosen Pembimbing: Wardana ING., Yudy Surya Irawan and Moch.Agus Choiron.

Pemanfaatan *Stainless Steel* untuk berbagai keperluan saat ini semakin meningkat. Pengelasan *Stainless Steel* berpotensi menghadapi masalah retak yang dianggap sebagai masalah paling serius dibanding berbagai cacat fisik lainnya. Retakan pada komponen struktur, bisa mengakibatkan kegagalan pada tingkat tegangan yang lebih rendah dibanding tegangan maksimal yang mampu diterima material. Banyak kegagalan terjadi akibat retak, meski tegangan luluh belum tercapai. Energi pengelasan mempengaruhi struktur mikro dan ketangguhan retak material. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) Baja AISI 304 pada zona pengelasan dengan pendekatan keseimbangan energi.

Rumus keseimbangan energi di setiap zona diperoleh dengan memperkirakan suplai energi pengelasan dan konsumsi energi dalam beberapa proses yang terjadi di setiap zona pengelasan seperti: *remelting/solidification*, pertumbuhan butir, rekristalisasi, sensitisasi dan pembangkitan tegangan sisa. Neraca energi digunakan untuk mengevaluasi profil *fracture resistance* pada setiap zona pengelasan : *Fusion Zone*, *High Temperature Heat Affected Zone*, *Low Temperature Heat Affected Zone* dan *Unaffected Base Metal*. Berdasarkan pendekatan keseimbangan energi, penelitian ini mengembangkan model baru untuk memperkirakan ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) Baja AISI 304 pada masing-masing zona pengelasan. Pengujian laboratorium *fracture resistance* merujuk pada standar pengujian ASTM E 1820 pada pengelasan AISI 304 dilakukan pada penelitian ini. Percobaan dilakukan menggunakan mesin *hydraulic servo pulsher* pada *compact tension specimen* tunggal. Dilakukan pencatatan *Load (P) vs Displacement (v)* untuk perumusan kurva J-R. Mekanisme retak dan komposisi presipitat dianalisis dengan menggunakan mikroskop optik (OM), *scanning electron microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS).

Hasil penelitian menunjukkan harga *fracture resistance* kritis (J_{IC}) yang dihitung dengan model keseimbangan energi memiliki kesesuaian yang baik dengan nilai *fracture resistance* kritis (J_{IC}) yang diperoleh pada tampilan grafik kurva J-R hasil pengujian laboratorium. Hasil penelitian ini akan menjadi rujukan penting dalam pemanfaatan AISI 304 yang melibatkan proses pengelasan AISI 304.

Kata kunci : keseimbangan energi, AISI 304, ketangguhan retak, *fracture resistance*

SUMMARY

Bambang Riyanta, *Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, Desember 2017, Energy Balance Principle on Critical Fracture Toughness (K_{IC}) Prediction and Critical Fracture Resistance (J_{IC}) Prediction of AISI 304 Welding Zones Academic Supervisors: Wardana ING., Yudy Surya Irawan and Moch.Agus Choiron.*

Stainless Steel Utilization for various purposes nowadays is increasing. Stainless Steel welding potentially faces cracks problems which are considered to be the most serious problem than other variety of physical defects. When there are some cracks in structural component, it could fail at a lower stress level than the ultimate strength of the material. Many failures have occurred as a result of fracture, even though the yield stress is not reached. Welding energy affecting microstructures and fracture toughness of the material. This study was conducted to predict critical fracture toughness (K_{IC}) and critical fracture resistance (J_{IC}) of AISI 304 Steel on the welding zones by energy balance approach.

The energy balance formula in each zone is obtained by estimating welding energy supply and energy consumption in several processes in each zone such as : remelting / solidification, grain growth, recrystallization, sensitization and residual stress generation. The energy balance was used to evaluate the fracture resistance profile at each welding zone : Fusion zone, High Temperature Heat Affected Zone, Low Temperatur Heat Affected Zone and Unaffected Base Metal zone. Base on energy balance approach, this present research develops a new model to estimate post welding AISI 304 critical fracture toughness (K_{IC}) and critical fracture resistance (J_{IC}) in each welding zone. Laboratory experimental testing of AISI 304 welding fracture resistance were carried out in this study. Single Compact Tension Specimen experiments base on ASTM E 1820 were held to record Load (P) vs Displacement (v) in order to construct J-R curve as a fracture resistance profile graphical display. Fracture mechanism and precipitates composition were analyzed using optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS).

The study result showed that the calculated J_{IC} by the model has a good agreement with J_{IC} values which are obtained on the J-R curve graphical display. This investigation will provide an important reference to engineering practice and evaluation. of AISI 304 welding.

Keywords : *energy balance, AISI 304, fracture toughness, fracture resistance*

KATA PENGANTAR

Puji Syukur hanyalah untuk Allah S.W.T. atas segala nikmat yang telah dikaruniakan secara adil kepada hamba-Nya. Shalawat dan salam semoga terlimpah kepada pemimpin dan junjungan umat, nabi besar Muhammad s.a.w. Atas izin Allah S.W.T. penulis dapat menyelesaikan penelitian dalam rangka penyusunan disertasi dengan judul:

PRINSIP KESEIMBANGAN ENERGI PADA PREDIKSI KETANGGUHAN RETAK KRITIS (K_{IC}) DAN *FRACTURE RESISTANCE* KRITIS (J_{IC}) BAJA AISI 304 DI DAERAH SAMBUNGAN LAS

untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat S-3 pada Program Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.

Penulis sadar sepenuhnya bahwa karya ini masih jauh dari sempurna, oleh karenanya masukan, kritik dan saran sangat diharapkan. Semoga karya ini bermanfaat bagi siapapun yang membacanya

Malang, 20 Desember 2017
Penulis,

Bambang Riyanta
PDTM- 137060200111009



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
DAFTAR SINGKATAN.....	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1 Pemanfaatan <i>Stainless Steel</i>	1
1.1.2 Retak pada Pengelasan <i>Stainless Steel</i>	5
1.1.3 Pengaruh Energi Pengelasan terhadap Mikrostruktur dan Ketangguhan Retak Material.....	6
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan dan Manfaat	7
BAB II	Error! Bookmark not defined.
TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Austenitic <i>Stainless Steel</i>	8
2.2. Zona dan Sub Zona Pengelasan	10
2.3. Pengelasan pada <i>Austenitic Stainless Steel</i>	13
2.3.1. Pengaruh Pengelasan terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik	13
2.3.2. Sensitisasi pada Pengelasan <i>Austenitic Stainless Steel</i>	15
2.4. Energi Impak dan Ketangguhan Retak pada Pengelasan <i>Stainless Steel</i>	22
2.5. Mekanika Perpatahan.....	27
2.5.1. <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i> dan <i>Elastic Plastic Fracture Mechanics</i>	27
2.5.2. Prinsip Keseimbangan Energi Retak.	29

BAB III.....	32
KERANGKA KONSEP	32
BAB IV.....	51
METODE PENELITIAN	51
4.1. Rancangan Penelitian.....	51
4.1.1. Perumusan model teoritik.....	52
4.1.2. Pembuktian Induktif	52
a. Bahan	52
b. Pengelasan	53
c. Pengamatan Mikrostruktur	53
d. Identifikasi Daerah Sensitisasi	57
e. Penyiapan Specimen Impak	57
f. Pengujian Impak Charpy.....	60
g. Penyiapan <i>Compact Tension Specimen</i> pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i>	62
h. Pengujian <i>Fracture Resistance</i>	63
BAB V.....	69
HASIL DAN PEMBAHASAN	69
5.1. Penghitungan Energi Input Pengelasan	72
5.2. Distribusi Energi Pengelasan	70
5.3. Penghitungan Konsumsi Energi pada Setiap Zona.....	72
5.4. Pengujian Neraca Keseimbangan Energi.....	75
5.4.1. Hasil Pengujian Impak Charpy.....	75
5.4.2. Koreksi terhadap Neraca Energi.....	90
5.5. Hasil pengujian <i>Fracture Resistance</i>	99
5.6. Pembahasan <i>Fracture Resistance</i>	111
BAB VI.....	117
KESIMPULAN DAN SARAN	117

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1.a. Sifat <i>Stainless Steel</i> pada berbagai <i>grade</i>	2
Tabel 1. 1.b. Sifat <i>Stainless Steel</i> pada berbagai <i>grade</i>	3
Tabel 2.1. Hasil penelitian <i>lattice</i> parameter berbagai karbida	18
Tabel 2.2. Energi pembentukan karbida	21
Tabel 2.3. Hubungan K_{IC} – CVN	26
Tabel 2.4. Koreksi Zona Plastis	28
Tabel 4.1. Komposisi Kimia <i>Stainless Steel</i> 304	53
Tabel 4.2. Detail Pengelasan	54
Tabel 5.1. Energi Pengelasan	70
Tabel 5.2. Energi Input Pengelasan dan Konsumsi Energi pada Pengelasan AISI 304	75
Tabel 5.3. Energi yang Diserap Material pada Pengujian Impak Charpy	94
Tabel 5.4. Hasil Perhitungan Neraca Keseimbangan Energi	94
Tabel 5.5. Iterasi untuk Mendapatkan Δa_i , v_i dan $PN(i)$	106
Tabel 5.6. Iterasi untuk Mendapatkan Δa dan J	108
Tabel 5.7. Fracture Resistance Kritis (J_{IC}) Hasil Pengujian Laboratorium	111
Tabel 5.8. Prediksi harga <i>Fracture Toughness</i> Kritis (K_{IC}) dan <i>Fracture Resistance</i> Kritis (J_{IC})	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Prosentase Pemanfaatan <i>Stainless Steel</i> pada Berbagai Bidang.....	1
Gambar 1.2. <i>Grade Stainless Steel</i>	2
Gambar 1.3. Grafik Pertumbuhan Produksi <i>Stainless Steel</i>	3
Gambar 1.4. Grafik Prosentase Kebutuhan Produksi <i>Stainless Steel</i>	4
Gambar 1.5. Pengembangan Baja AISI 304 dalam berbagai varian	4
Gambar 1.6. Retak di Daerah Las pada Komponen <i>Stainless Steel</i>	5
Gambar 2.1. Diagram Fase <i>Stainless Steel</i>	8
Gambar 2.2. <i>Ternary Phase Diagram FeCrNi Stainless Steel</i>	9
Gambar 2.3. Diagram Phase Cr-Ni-C : Tie Line Ni with Ni and Cr ₂₃ C ₆	9
Gambar 2.4. Diagram phase Fe-Cr-C @ 1000° C.....	10
Gambar 2.5. Zona pengelasan.....	10
Gambar 2.6. Zona dan Subzone Pengelasan Berdasar Suhu.....	11
Gambar 2.7. Pembagian Zona Berdasar Mikrostruktur	12
Gambar 2.8. Profil Tegangan Sisa Akibat Pengelasan.....	13
Gambar 2.9. Hubungan antara Parameter Pengelasan dengan Distribusi Temperatur, Mikrostruktur dan Tegangan.....	14
Gambar 2.10. Precipitat pada Kondisi <i>Equilibrium</i>	15
Gambar 2.11. <i>Predominant</i> Precipitat M ₂₃ C ₆ pada Berbagai Komposisi	16
Gambar 2.12. Evolusi Fraksi Volume pada Baja AISI 316 dengan Suhu 700° C.....	16
Gambar 2.13. <i>Driving Force</i> kondisi stabil karbida pada <i>Stainless steel</i>	17
Gambar 2.14. Struktur dan Posisi Atom Cr ₂₃ C ₆	18
Gambar 2.15. <i>Flux Balance</i> dan <i>Mass Balance</i> pada kondisi setimbang.....	19
Gambar 2.16. Perubahan Energi Bebas Nukleasi Homogen.....	20
Gambar 2.17. Energi Inisiasi Retak dan Energi Propagasi Retak pada Pengujian Impak.....	23

Gambar 2.18. Hubungan Serapan energi dengan <i>Plain Strain Fracture Toughness</i> pada Pengujian Impak	24
Gambar 2.19. Hubungan antara Ketangguhan Retak (K_{IC}) dengan CVN <i>Energy Absorbtion</i>	25
Gambar 2.20. Diagram Beban vs <i>Displacement</i>	30
Gambar 3.1. Dissipasi Energi Pengelasan AISI 304	33
Gambar 3.2. Pengaruh Pengelasan pada Prediksi Ketangguhan Retak Material pada Setiap Zona	34
Gambar 3.3. Proses yang Mengkonsumsi Energi Pengelasan AISI 304	35
Gambar 3.4. Distribusi Suplai Energi Pengelasan.....	36
Gambar 3.5. Pendekatan Distribusi Gaussian pada Distribusi Energi Pengelasan	37
Gambar 3.6. Distribusi Tegangan Sisa	39
Gambar 3.7. Keseimbangan Energi pada Pengelasan AISI 304	40
Gambar 3.8. <i>Time Test Record Charpy Impact Test</i>	45
Gambar 3.9. Konsumsi Energi Retak pada Pengelasan Baja AISI 304	45
Gambar 4.1. Skema Tahap Penelitian	51
Gambar 4.2. <i>Stainless Steel</i>	53
Gambar 4.3. Pengelasan pada Specimen Awal	53
Gambar 4.4. Pengelasan pada Penyiapan Specimen Uji Impak	54
Gambar 4.5. Pengelasan pada Penyiapan Specimen Uji <i>Fracture Resistance</i>	54
Gambar 4.6. Specimen Uji Mikrostruktur	55
Gambar 4.7. Mikrostruktur Zona Las	55
Gambar 4.8. Mikrostruktur Zona HTHAZ	56
Gambar 4.9. Mikrostruktur Zona LTHAZ.....	56
Gambar 4.10. Mikrostruktur Zona <i>Unaffaceted Base Metal</i>	56
Gambar 4.11. Penentuan Batas Zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan <i>Unaffected Base Metal</i>	57
Gambar 4.12. Desain Posisi Las terhadap Sumbu Takik	58
Gambar 4.13. Desain Posisi Potongan pada Penyiapan Specimen Impak Daerah HTHAZ, LTHAZ dan <i>Unaffected Base Metal</i>	58

Gambar 4.14. Specimen Uji Impak Sesuai ASTM E23-02a.....	59
Gambar 4.15. Posisi Takik pada Specimen Uji Impak.....	59
Gambar 4.16. Mesin Uji Impak dan Pemasangan Load Cell	60
Gambar 4.17. Perangkat Data Akuisisi	61
Gambar 4.18. Desain Spesimen Uji Fracture Resistance Sesuai ASTM E 1820.....	62
Gambar 4.19. Specimen Uji <i>Fracture Resistance</i> Sesuai ASTM E 1820.....	62
Gambar 4.20. <i>K-Based Crack Resistance</i>	63
Gambar 4.21. <i>Load vs Displacement</i> dengan Dua Tipe K_{IC}	64
Gambar 4.22. <i>Load vs Displacement</i> pada Pengujian <i>Multiple Speciment</i>	66
Gambar 4.23. <i>Load vs Displacement</i> pada Pengujian <i>Unloading Slope</i>	66
Gambar 4.24. Persiapan Pengujian <i>Fracture Resistance</i>	67
Gambar 4.25. Diagram Alir Pengujian Induktif.....	68
Gambar 5.1. Effisiensi <i>Arc Welding</i> dengan Variasi Kecepatan Pengelasan.....	70
Gambar 5.2. Effisiensi Berbagai Jenis Pengelasan	71
Gambar 5.3. Hasil Perhitungan Distribusi Energi Pengelasan.....	71
Gambar 5.4. <i>Residual Stress Distribution</i>	73
Gambar 5.5. <i>Image Capture</i> Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona Las.....	76
Gambar 5.6. Grafik Penyerapan Energi Saat Benturan pada Zona Las	77
Gambar 5.7. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona Las	78
Gambar 5.8. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona Las	
Skala Logaritmik	79
Gambar 5.9. Pofil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona Las.....	79
Gambar 5.10. <i>Image Capture</i> saat Benturan pada Pengujian Impak Zona HTHAZ.....	80
Gambar 5.11. Grafik Penyerapan Energi saat Benturan pada Zona HTHAZ	81
Gambar 5.12. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona HTHAZ.....	81
Gambar 5.13. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona HTHAZ	
Skala Logaritmik	82
Gambar 5.14. Pofil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona HTHAZ.....	82

Gambar 5.15. <i>Image Capture</i> saat Benturan pada Pengujian Impak Zona LTHAZ	83
Gambar 5.16. Grafik Penyerapan Energi saat Benturan pada Zona LTHAZ.....	84
Gambar 5.17. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona LTHAZ	84
Gambar 5.18. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona LTHAZ Skala Logaritmik	85
Gambar 5.19. Pofil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona LTHAZ	85
Gambar 5.20. <i>Image Capture</i> saat Benturan pada Pengujian Impak Zona UBM	86
Gambar 5.21. Grafik Penyerapan Energi saat Benturan pada Zona UBM.....	87
Gambar 5.22. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona UBM	87
Gambar 5.23. <i>Fast Fourier Transform</i> pada Data Pengujian Impak Zona UBM Skala Logaritmik	88
Gambar 5.24. Pofil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona UBM	88
Gambar 5.25. Overshoot Negatif a dan Variasi Cacah Puncak b pada Pengujian Impak	89
Gambar 5.26. Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> – <i>EDX</i> Patahan Pada Daerah Overshoot Negatif Uji Impak	90
Gambar 5.27. Hasil <i>Scanning Electron Microscope</i> Patahan pada Daerah Puncak Uji Impak : a. <i>Intermediate Size Precipitate</i> b. <i>Large Size Precipitate</i>	91
Gambar 5.28. Profil Penyerapan Energi Zona Las pada Pengujian Impak	92
Gambar 5.29. Profil Penyerapan Energi Zona HTHAZ pada Pengujian Impak	92
Gambar 5.30. Profil Penyerapan Energi Zona LTHAZ pada Pengujian Impak.....	93
Gambar 5.31. Profil Penyerapan Energi Zona UBM pada Pengujian Impak.....	93
Gambar 5.32. Neraca Keseimbangan Energi pada Zona Las	93
Gambar 5.33. Neraca Keseimbangan Energi pada Zona HTHAZ	96
Gambar 5.34. Neraca Keseimbangan Energi pada Zona LTHAZ.....	96
Gambar 5.35. Neraca Keseimbangan Energi pada Zona UBM.....	97

Gambar 5.36. Pengamatan Pembentukan Retak Awal dengan Beban Fatik Menggunakan <i>Travelling Microscope</i>	99
Gambar 5.37. Pengamatan Perambatan Retak Saat Proses <i>Unloading/Loading</i> pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i>	100
Gambar 5.38. Pengukuran <i>Displacement</i> Menggunakan <i>Displacement Gage</i> Proses <i>Unloading/Loading</i> pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i>	101
Gambar 5.39. Plot <i>Displacement (v)</i> vs Gaya (P) pada pengujian pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i> Zona Las	102
Gambar 5.40. Plot <i>Displacement (v)</i> vs Gaya (P) pada pengujian pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i> Zona HTHAZ	102
Gambar 5.41. Plot <i>Displacement (v)</i> vs Gaya (P) pada pengujian pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i> Zona LTHAZ	103
Gambar 5.42. Plot <i>Displacement (v)</i> vs Gaya (P) pada pengujian pada Pengujian <i>Fracture Resistance</i> Zona UBM.....	103
Gambar 5.43. Diagram Alir untuk Mendapatkan Konstanta L,M,N.....	104
Gambar 5.44. Diagram Alir untuk Mendapatkan Harga Δa_i , $v_p(i)$	105
Gambar 5.45. Penggunaan <i>Mathlab</i> untuk Mendapatkan Konstanta Normalisasi L,M dan N	107
Gambar 5.46. Kurva J-R pada Zona Las	109
Gambar 5.47. Kurva J-R pada Zona HTHAZ	109
Gambar 5.48. Kurva J-R pada Zona LTHAZ.....	110
Gambar 5.49. Kurva J-R pada Zona UBM.....	110
Gambar 5.50. Superposisi Kurva J-R pada Semua Zona Pengelasan	113
Gambar 5.51. Bentuk Patahan Specimen Uji Impak.....	114
Gambar 5.52. Bentuk Patahan Specimen Uji <i>Fracture Resistance</i>	114
Gambar 5.53. Superposisi Penyerapan Energi pada Pengujian Impak	115

DAFTAR LAMPIRAN

AISI 304 *Data Sheet*

Hasil Pengujian SEM EDX

Penghitungan Kurva J-R

Standar Pengujian *Fracture Resistance* ASTM E 1820



DAFTAR SIMBOL

- I : nucleation rate (nuclei per unit volume per detik)
- N : number density of nucleation site
- ΔG^* : nucleation activation energy (Joules)
- R : gas constant
- T : absolute temperature (Kelvin)
- ν : attempt frequency: kT/h
- Q_d : the activation energy for the transfer of atoms across the interface.(Joules)
- ΔG : total energy bebas nukleasi (Joules)
- ΔG_v : free energy volume
- r : radius nucleus (Angstrom)
- γ : surface energy (erg/cm²)
- G^* : activation energy (joules)
- K_{Id} : impact plane strain fracture toughness (ksi $\sqrt{\text{in}}$)
- E : modulus elastisitas bahan (ksi)
- CVN : energy absorption (ft.lbs)
- K_{IC} : ketangguhan retak (ksi $\sqrt{\text{in}}$)
- σ_{ys} : tegangan yield (ksi)
- β : faktor bentuk (dimensionless)
- σ : tegangan (Kg/m²)
- a : panjang retak (mm)
- F : gaya luar (Newton)
- U_t : energi elastis bahan total (Joules)
- v : displacement (mm)
- $q(r)$: energi pada jarak r dari pusat sumber panas (Joules)
- Q : input energi pengelasan (Joules)
- r' : parameter distribusi Gaussian

- r : jarak dari pusat sumber panas (mm)
- E_m : Energi yang diperlukan untuk remelting 1 gram material ($Joule/gram$)
- ΔH_f : panas laten fusi ($kalori/mol$)
- C_p : *specific heat* ($kalori/mol$)
- T_1 : Temperatur awal ($Kelvin$)
- T_2 : Temperatur pengelasan ($Kelvin$)
- D : diamter butir (cm)
- U_{rs} : energi yang dikonsumsi oleh material untuk deformasi elastis ($Joules$)
- σ_{rs} : tegangan sisa (Kg/mm)
- E : modulus elastisitas.
- E_{mi} : energi impact sebelum pengelasan ($Joules/cm^3$)
- E_{mw} : energi impact pasca pengelasan ($Joules/cm^3$)
- Q_{wi} : energi pengelasan ($Joules$)
- W_{wo} : konsumsi energi pada setiap zona ($Joules/cm^3$)
- U : *strain energy* ($Joules$)
- W : *work expended in fracturing material over da*
- J_{el} : *fracture energy for elastic part* ($Joules$)
- J_{pl} : *fracture energy for plastic part* ($Joules$)
- J_{IC} : *Critical fracture energy for EPFM*
- β : *geometry factor*
- H : *geometry factor*
- E : *elastic modulus*
- F_p : *plastic modulus*
- F_{init} : Beban pada saat inisiasi retak
- F_{gy} : Beban *yield*
- F_{max} : Beban maksimum
- K_Q : Ketangguhan retak sementara
- P : Beban
- $f(a/W)$: fungsi kalibrasi

W : dimensi pada specimen ($W=2B$, B : tebal)

K : faktor intensitas tegangan

E : modulus elastisitas bahan

ν : poisson's ratio

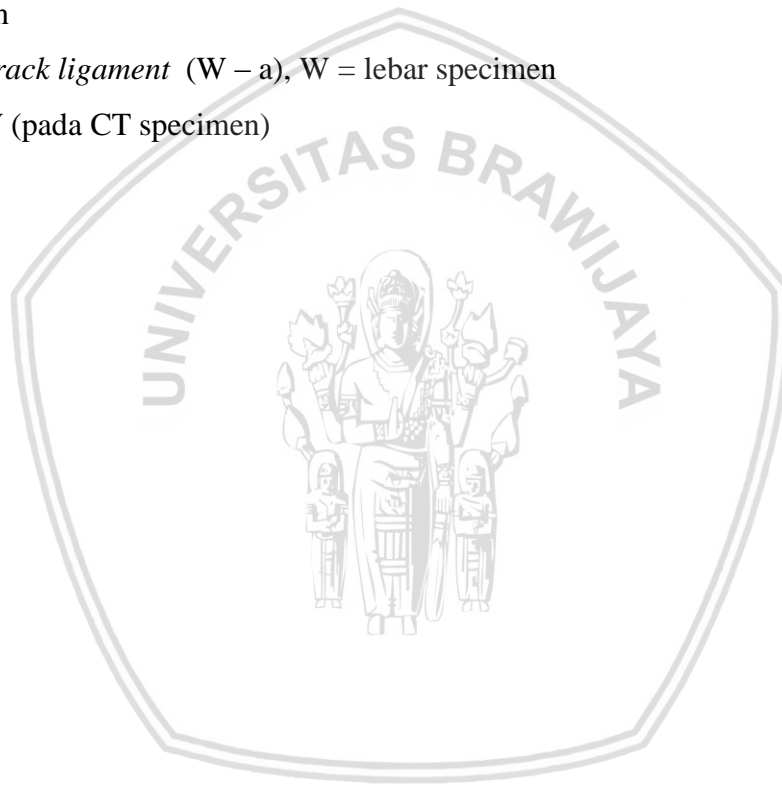
P : beban

V_{pl} : *plastic displacement*

B : tebal specimen

b : specimen *uncrack ligament* ($W - a$), W = lebar specimen

ρ_{pl} : $2 + 0,522 b/W$ (pada CT specimen)



DAFTAR SINGKATAN

AISI 304	: <i>American Iron and Steel Institute Standard 304</i>
ASTM	: <i>American Section of the International Association for Testing Materials</i>
CVN	: <i>Charpy V-Notch</i>
CTOD	: <i>Crack Tip Opening Displacement</i>
CTS	: <i>Compact Tension Specimen</i>
EDM	: <i>Electro Discharge Machining</i>
EDS	: <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
EPFM	: <i>Elastic Plastic Fracture Mechanics</i>
FZ	: <i>Fusion Zone</i>
GMAW	: <i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	: <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HAZ	: <i>Heat Affected Zone</i>
HTHAZ	: <i>High Temperature Heat Affected Zone</i>
LTHAZ	: <i>Low Temperature Heat Affected Zone</i>
LEFM	: <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i>
SEM	: <i>Scanning Electrone Microscope</i>
SMR	: <i>Steel and Metals Market Research</i>
SSY	: <i>Small Scale Yielding</i>
UBM	: <i>Unaffected Base Metal</i>

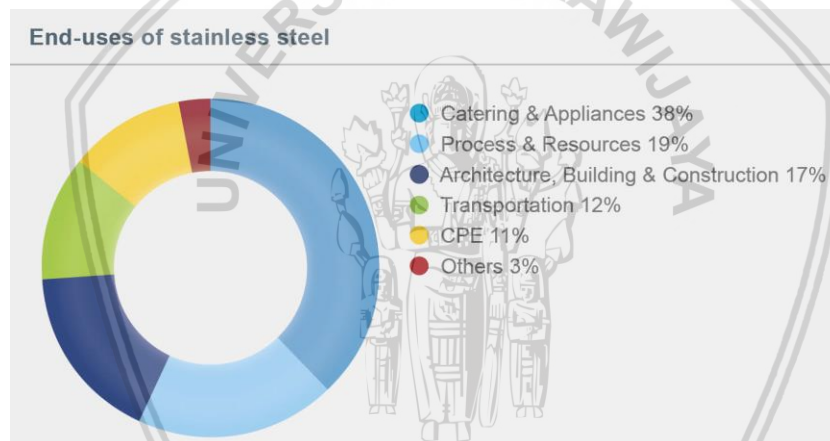


BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1.1.1 Pemanfaatan *Stainless Steel*

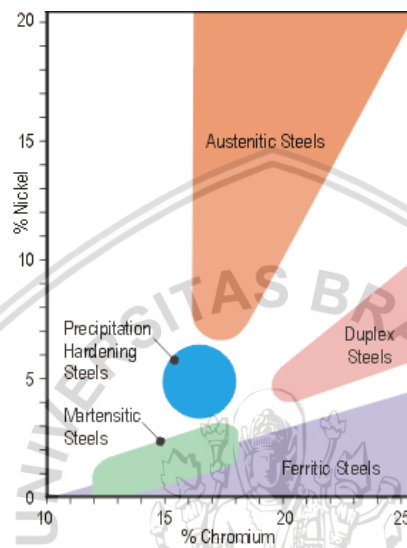
Stainless Steel banyak digunakan sebagai bahan komponen maupun struktur di industri, khususnya industri di lingkungan *agresive* dan industri yang menuntut kontaminasi minimal. Prosentase pemanfaatan *Stainless Steel* pada berbagai bidang dapat dilihat pada diagram di tampilan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Prosentase Pemanfaatan *Stainless Steel* pada Berbagai Bidang
(Sumber: *Steel and Metals Market Research*, 2012)

Stainless Steel adalah paduan logam yang terdiri dari paling tidak 10.5% Chromium (Cr) dan minimal 50% Besi (Fe). Dari berbagai *grade Stainless Steel* (*Austenitic Stainless Steel*, *Martensitic Stainless Steel*, *Ferritic Stainless Steel*, *Duplex Stainless Steel*, *Precipitation hardening Stainless Steel*), *Austenitic Stainless Steel* adalah jenis *Stainless Steel* yang paling banyak digunakan karena ketahanan korosi, sifat mekanis dan nilai ekonomisnya (McGuire, 2008).

Di dalam Gambar 1.2. bawah ini ditampilkan diagram *grade Stainless Steel* berdasar komposisi chromium dan nickel . Sifat *Stainless Steel* pada berbagai *grade* ditampilkan pada Tabel 1.1.a dan Tabel 1.1.b



Gambar 1.2. *Grade Stainless Steel*
(Sumber: *Steel and Metals Market Research*, 2012)

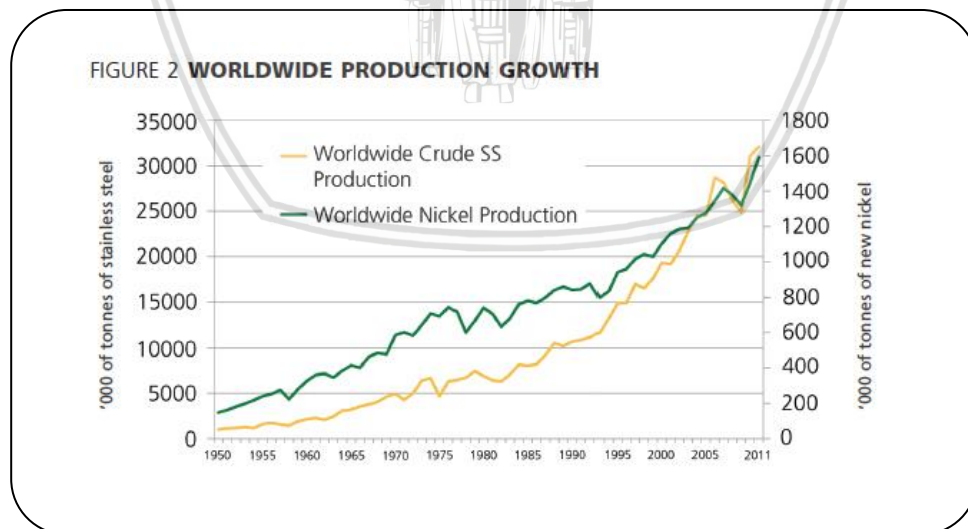
Tabel 1. 1.a. Sifat *Stainless Steel* pada Berbagai Grade
(Sumber: *Steel and Metals Market Research* , 2012)

Group Paduan	Respon Magnetik	Laju Work Hardening	Ketahanan korosi	Hardenable
<i>Austenitic</i>	Secara umum tidak	Sangat tinggi	Tinggi	<i>By Cold Work</i>
<i>Duplex</i>	Ya	Sedang	Sangat tinggi	Tidak
<i>Ferritic</i>	Ya	Sedang	Sedang	Tidak
<i>Martensitic</i>	Ya	Sedang	Sedang	<i>Quench & Temper</i>
<i>Precipitation Hardening</i>	Yes	Sedang	Sedang	<i>Age Harden</i>

Tabel 1.1.b. Sifat *Stainless Steel* pada Berbagai Grade
(Sumber : *Steel and Metals Market Research*, 2012)

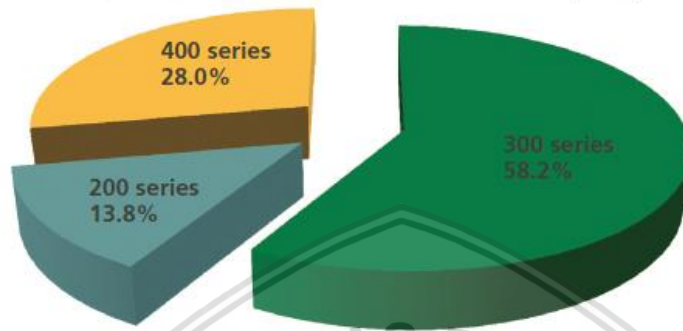
Group Paduan	Respon Magnetik	Laju Work Hardening	Ketahanan korosi	<i>Hardenable</i>
<i>Austenitic</i>	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Sangat tinggi
<i>Duplex</i>	Sedang	Rendah	Sedang	Tinggi
<i>Ferritic</i>	Sedang	Tinggi	Rendah	Rendah
<i>Martensitic</i>	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
<i>Precipitation Hardening</i>	Sedang	Rendah	Rendah	Tinggi

Pemanfaatan *Stainless Steel* untuk berbagai keperluan semakin meningkat. Sepanjang seratus tahun terakhir peningkatan produksi *Stainless Steel* cukup stabil. Hal ini dapat dilihat dari grafik pertumbuhan produksi *Stainless Steel* di dunia seperti tampak pada Gambar 1.3.



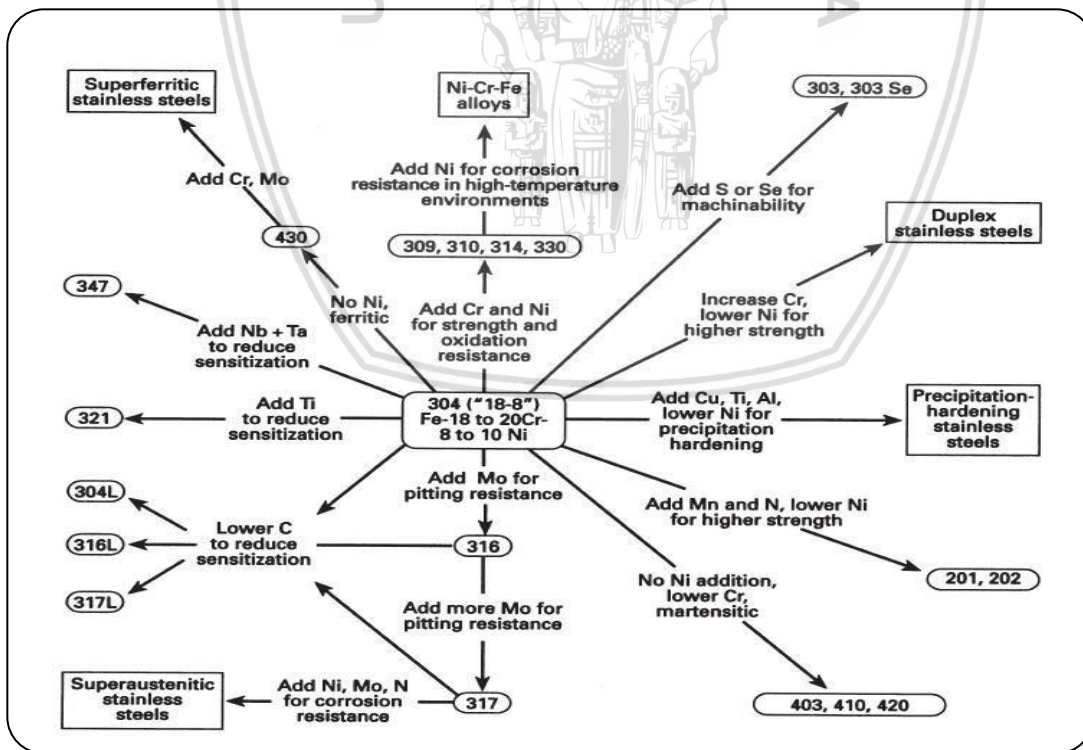
Gambar 1.3. Grafik Pertumbuhan Produksi *Stainless Steel*
(Sumber: *Australian Stainless Steel Development Association*, 2002)

Dua pertiga kebutuhan produksi *Stainless Steel* didominasi oleh *Stainless Steel* seri 300 seperti ditampilkan pada Gambar 1.4. berikut ini :



Gambar 1.4. Grafik Prosentase Kebutuhan Produksi *Stainless Steel*
(Sumber: *Australian Stainless Steel Development Association*, 2012)

Baja AISI 304 adalah *basic grade* dari berbagai macam varian *Stainless Steel*. Dalam Gambar 1.5. di bawah ini ditampilkan pengembangan AISI 304 menjadi berbagai varian.



Gambar 1.5. Pengembangan Baja AISI 304 dalam Berbagai Varian
(Sumber: *Metline Industries*, 2014)

1.1.2 Retak pada Pengelasan *Stainless Steel*

Dibandingkan cacat fisik yang lain, retak dianggap paling buruk pengaruhnya terhadap kualitas sambungan mengingat retak kecil dapat dengan mudah berkembang dan mengakibatkan kegagalan. Cacat fisik yang dapat terjadi pada pengelasan adalah: *undercut*, *insufficient fusion*, deformasi berlebihan, porositas. Semua standar pengelasan tidak memberikan toleransi sama sekali terhadap cacat retak tetapi masih dapat menerima cacat fisik lainnya sampai batas tertentu (Girish P. Kelkar, 2008).

Contoh retak di daerah las pada komponen dan struktur yang menggunakan *Stainless Steel* ditampilkan pada Gambar 1.6 :



Retak pada Propeler Retak pada Daerah Las Struktur Penopang Poros Patah

Gambar 1.6. Retak di Daerah Las pada Komponen *Stainless Steel*

(Sumber : <https://www.olympus-ims.com/en/application/fatigue-crack-detection-marine-propellers/>)

Pada daerah pengelasan, retak bisa terjadi saat proses pengelasan maupun ketika komponen digunakan. Retak yang terjadi saat proses pengelasan dapat dikategorisasi dalam dua jenis retak yaitu retak panas dan retak dingin. Retak panas terjadi saat proses pendinginan sementara retak dingin terjadi setelahnya yang diakibatkan oleh fatik atau korosi (Girish P. Kelkar, 2008).

Baja AISI 304 sebagai *Austenitic Stainless Steel* grade dasar peka terhadap retak panas . Pada *Austenitic Stainless Steel* , paduan eutektik yang sudah mencair pada suhu yang lebih rendah menjadi penyebab retak ini. Efek ini muncul terutama ketika solidifikasi *Stainless Steel* menghasilkan fasa utama austenitik pada zona fusi (Buijs Eng. N.W., 1993).

Peningkatan tegangan yang mengakibatkan cacat, tegangan tarik dan ketangguhan retak material rendah dapat menyebabkan kemunculan dan perambatan retak. Pencegahan kemunculan retak dan perambatan retak dapat dilakukan secara efektif dengan melakukan pengendalian terhadap tegangan yang bekerja pada material dan pengendalian terhadap ketangguhan retak material (Girish P. Kelkar, 2008).

1.1.3 Pengaruh Energi Pengelasan terhadap Mikrostruktur dan Ketangguhan Retak Material.

Energi pengelasan mempengaruhi mikrostruktur serta ketangguhan retak material. Chen et al. (2013) melakukan penelitian terhadap pengaruh energi pengelasan terhadap mikrostruktur dan ketangguhan retak material *Stainless Steel* 304. Hasil penelitian menunjukkan penurunan keuletan dan peningkatan jumlah *ferrite* dipengaruhi oleh peningkatan energi panas pengelasan. Meskipun penelitian berkaitan dengan pengaruh pengelasan terhadap kekuatan retak Baja AISI 304 telah banyak dilakukan namun prediksi kekuatan retak Baja AISI 304 akibat pengelasan belum pernah dirumuskan. Atas dasar inilah penelitian berkaitan dengan pengembangan model untuk memprediksi pengaruh pengelasan terhadap kekuatan retak Baja AISI 304 perlu dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Suplai energi pengelasan pada Baja AISI 304 mengakibatkan perubahan struktur mikro, berpotensi mempengaruhi kekuatan retak bahan. Berkaitan dengan hal tersebut permasalahan yang akan dikaji pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana energi pengelasan pada Baja AISI 304 mempengaruhi ketersediaan energi pada pembentukan retak dan propagasi retak ? Permasalahan pertama ini berkaitan dengan neraca keseimbangan energi pada pengelasan Baja AISI 304.
2. Bagaimana pengelasan pada Baja AISI 304 mempengaruhi harga ketangguhan retak (K_{IC}) dan *fracture resistance* (J_{IC}) ? Permasalahan kedua meliputi :
 - Bagaimana *formula* prediksi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan prediksi *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada pengelasan Baja AISI 304 ?

- Bagaimana hasil prediksi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ?
- Bagaimana kesesuaian prediksi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) dengan hasil pengujian laboratorium pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ?
- Bagaimana karakter patahan pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ?
- Apakah penyebab variasi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance kritis* (J_{IC}) ?

1.3 Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan:

1. Terumuskan neraca keseimbangan energi retak pada pengelasan Baja AISI 304.
2. Terumuskan model yang dapat digunakan pada prediksi ketangguhan retak (K_{IC}), *Fracture resistance* (J_{IC}) Baja AISI 304 pada daerah pengelasan menggunakan neraca keseimbangan energi pada setiap zona. Tujuan kedua meliputi :
 - Terumuskan *formula* prediksi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan prediksi *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada pengelasan Baja AISI 304 ?
 - Diperoleh hasil prediksi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ?
 - Diperoleh nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) dari hasil pengujian laboratorium pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ?
 - Diketahui karakter patahan pada setiap zona pengelasan Baja AISI 304 ? Diketahui penyebab variasi nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance kritis* (J_{IC}) ?

Manfaat penelitian :

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai alternatif metode penentuan nilai ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) Baja AISI 304 pasca pengelasan tanpa harus melakukan pengujian laboratorium yang rumit.

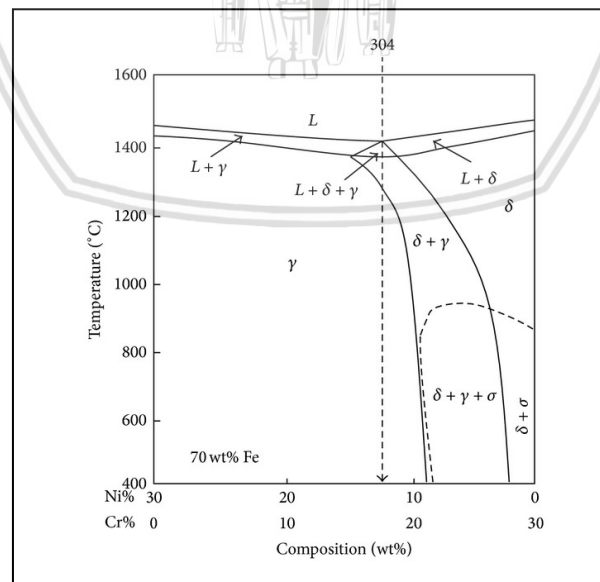
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Austenitic Stainless Steel*

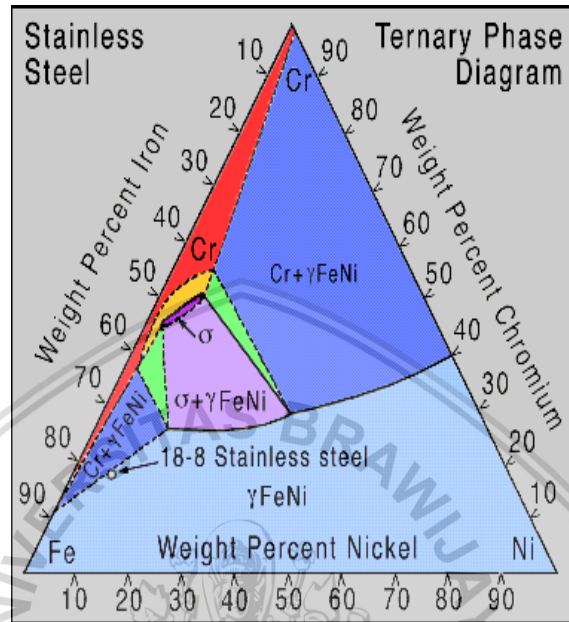
Austenitic Stainless Steel memiliki struktur fcc sehingga terdapat lebih banyak bidang dislokasi dan interstisi rendah. Hal ini menyebabkan keuletan material tinggi dan tidak memiliki harga tegangan *yield* yang pasti.

Saat proses pendinginan baja karbon, *Austenite* berubah menjadi campuran ferit dan sementit. Pada pendinginan *Stainless Steel austenitic*, krom dan nikel dengan kadar tinggi menekan proses transformasi dan menjaga struktur tetap pada *phase austenite*. (Nikel mempertahankan *phase austenite* saat pendinginan dan chrome memperlambat transformasi). Cukup dengan 8% nikel, struktur dapat dijaga sepenuhnya *austenite*). *Austenitic Stainless Steel* tersolidifikasi secara primer *ferritic* atau *austenitic* sangat tergantung pada komposisi krom dan nikel. Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut:

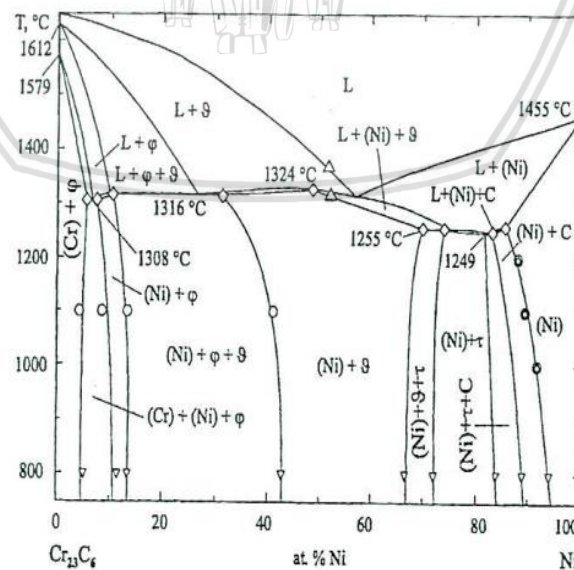


Gambar 2.1. Diagram *Phase Stainless Steel*
(Sumber: Chih-Chun Hsieh, 2014)

Gambar 8,9 dan 10 berturut-turut menampilkan ternary phase diagram untuk *Stainless Steel*, diagram *phase* Cr-Ni-C dan diagram *phase* Fe-Cr-C @ 1000° C(Yiding,2009; AlexandraV.Khvan, 2014)

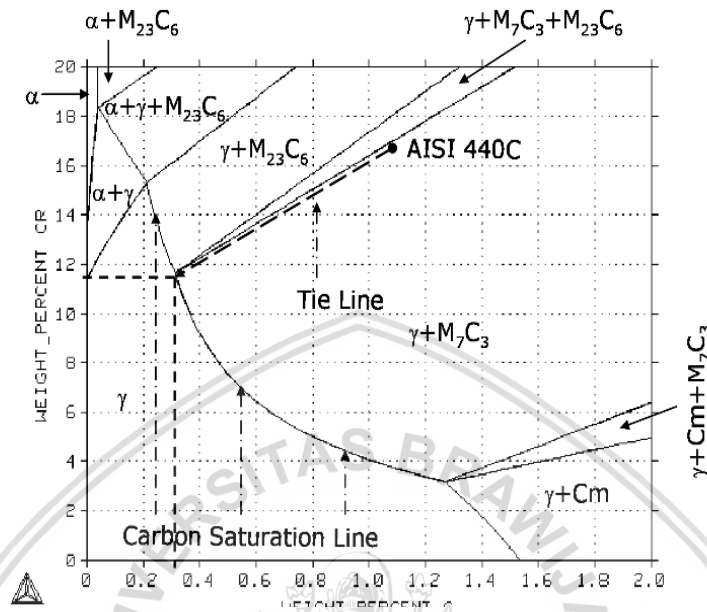


Gambar 2.2. Ternary Phase Diagram FeCrNi Stainless Steel
(Sumber: internet <http://chemsoc.velp.info/alloys.php?elementno=24>)



Gambar 2.3. Diagram *Phase* Cr-Ni-C: *Tie Line* Ni with Ni and Cr₂₃C₆
(Sumber: Yiding, 2009)

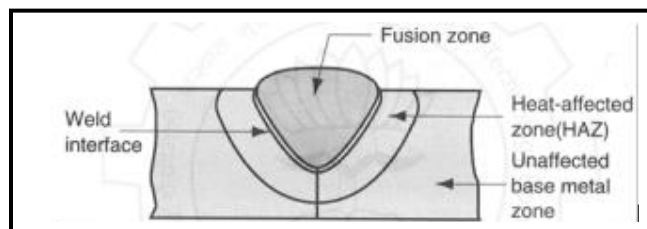
The composition plane for the Fe-Cr-C ternary phase diagram at 1000°C (1832°F) is shown on Figure 1. The carbon content is plotted along the horizontal axis and the chromium content along the vertical axis of the composition plane.



Gambar 2.4. Diagram Phase Fe-Cr-C @ 1000° C
(Sumber: Yiding, 2009)

2.2. Zona dan Subzona Pengelasan

Pemanfaatan *Austenitic Stainless Steel* untuk kepentingan komponen dan struktur sering melibatkan pengerjaan las. Pengaruh panas akibat proses pengelasan terhadap sifat mekanis bahan pada sambungan las tidak dapat dihindari. Secara umum las dibagi dalam empat zona yang berbeda yaitu *Fusion Zone* (1), *Weld Interface* (2), *Heat Affected Zone* (3) dan (4) *Base Metal* (Gambar 2.5).



Gambar 2.5. Zona pengelasan

(Sumber: http://www.iitg.ernet.in/engfac/ganu/public_html/metal_welding_processes)

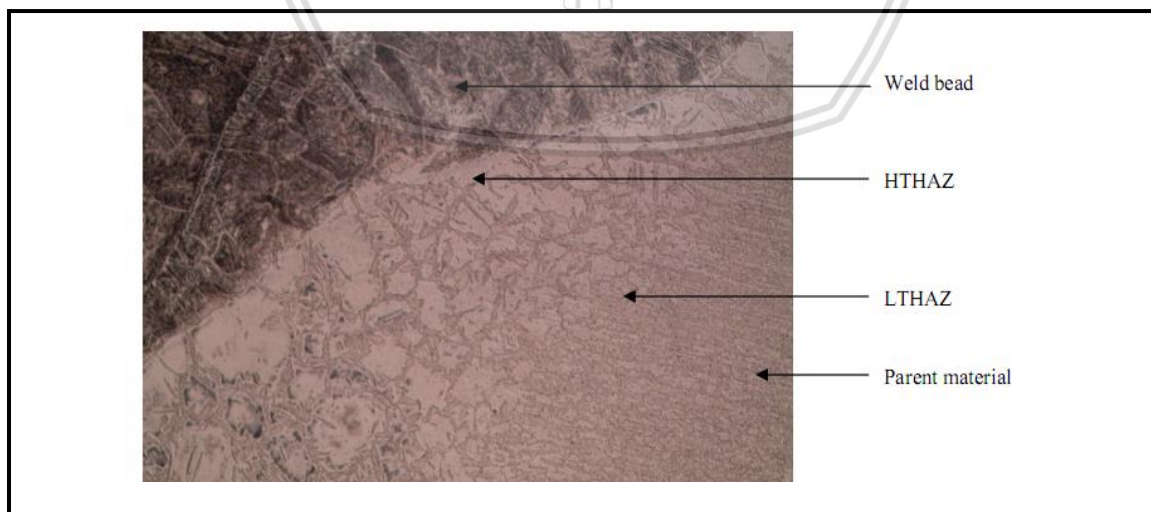
Akibat panas yang sangat tinggi pada zona las, logam dasar atau campuran logam dasar dengan material pengisi mencair. Tingkat homogenitas sangat ditentukan oleh konveksi di dalam logam cair. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya konveksi panas di dalam logam cair adalah: *buoyancy force*, *surface tension gradient force*, *electromagnetic force* dan *friction force*. Proses peleburan pada *fusion zone* sangat mirip dengan proses *casting*.

Akibat *remelting* dan *solidification* pada suhu di atas suhu cair, mikro struktur pada zona ini berubah sangat signifikan.

Weld Interface Zone adalah zona batas antara *fusion zone* dan *heat affected zone*. Zona ini sangat sempit dan lembek berisi logam cair yang tidak berkesempatan untuk bercampur.

Heat affected zone menerima panas di bawah *solidus temperature*. Temperatur pada zona ini masih cukup tinggi sehingga terjadi perubahan mikro struktur. Banyaknya perubahan mikro struktur pada *heat affected zone* tergantung pada: *input panas*, *suhu puncak*, *waktu pemanasan*, dan *laju pendinginan*. Bentuk mikrostruktur pada zona ini menampilkan *heat treated structure* akibat dari proses transformasi *phase*, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir. Perubahan mikrostruktur menyebabkan sifat mekanik zona ini lebih lemah dari zona lain.

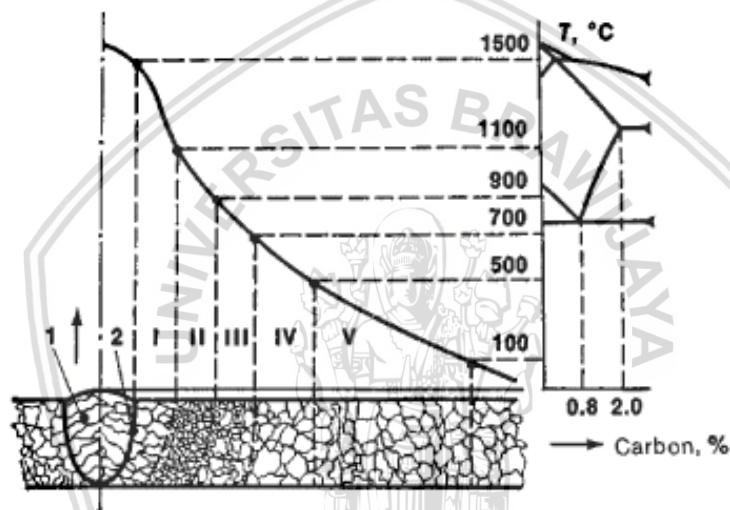
Berdasar suhu, pada beberapa pustaka, zona pengelasan terbagi menjadi: *Fusion Zone*, *heat affected zone* terdiri dari subzona: *High Temperature Heat Affected Zone* (HTHAZ) dan *Low Temperature Heat Affected Zone* (LTHAZ) seperti ditampilkan pada gambar 12



Gambar 2.6. Zona dan Subzona Pengelasan Berdasar Suhu
(Sumber: Louise Greeff, 2006)

Pada *High Temperature Heat Affected Zone* meski suhu puncaknya di bawah suhu melting namun cukup tinggi untuk pertumbuhan butir secara *extensive*. Akibat panas tidak lagi memadai, pertumbuhan butir tidak lagi signifikan terjadi pada *Low Temperature Heat Affected Zone*. Pada zona ini karena temperature cukup untuk memenuhi kebutuhan panas pembentukan *Austenite* maka terjadi *recrystallisation* selama proses pengelasan (Marry Louise Greeff, 2006).

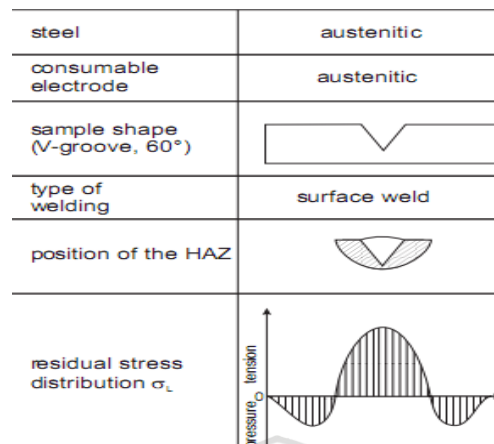
Berdasar mikro struktur zona terpengaruh panas (HAZ) terbagi dalam beberapa sub zona: I. *coarse grain* HAZ, II. *fine grain* HAZ, III. *intercritical* HAZ dan IV. *tempered* HAZ. Pembagian zona berdasarkan mikro struktur ditampilkan pada gambar 13.



Gambar 2.7. Pembagian Zona Berdasar Mikrostruktur
(Sumber: Polukhin, 1977)

Mikrostruktur pada *unaffected base metal zone* tidak berubah, namun pada zona disekitar *heat affected zone* ini tegangan sisa akibat penyusutan *fusion zone* sangat tinggi.

Studi profil tegangan sisa akibat pengelasan selain dilakukan oleh Dalle Donne (2001), juga dilakukan oleh Coelho (2009). Di bawah ini di tampilkan profil tegangan sisa akibat pengelasan pada *Austenitic Stainless Steel*.



Gambar 2.8. Profil Tegangan Sisa Akibat Pengelasan
(Sumber: *The Welding and Joining Institute (ISF)*
of the RWTH Aachen University, 2002)

2.3. Pengelasan pada *Austenitic Stainless Steel*

2.3.1. Pengaruh Pengelasan terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik

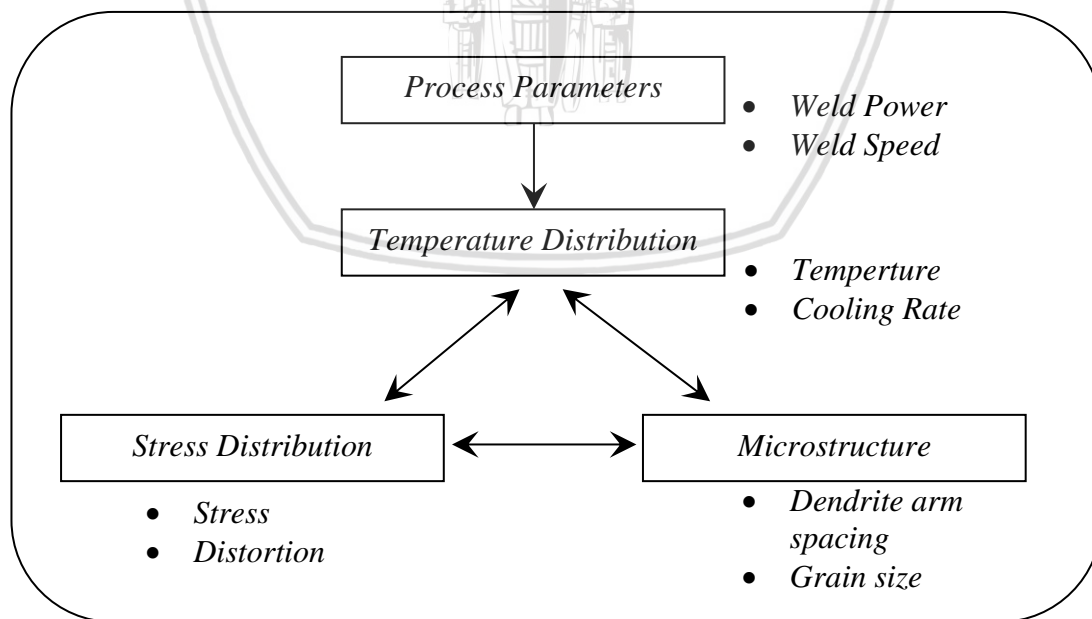
Panas pengelasan mempengaruhi sifat mekanik *Austenitic Stainless Steel*. Pengerjaan dingin meningkatkan kekuatan dan kekerasan namun menurunkan keuletannya. Proses anil pada suhu 1045° C diikuti dengan pendinginan cepat setelah pengerjaan dingin akan mengembalikan material pada kondisi semula, menghilangkan segregasi, sensitisasi, *phase* sigma dan memulihkan keuletan. Meski demikian pendinginan cepat akan membangkitkan tegangan sisa bahkan bisa sebesar tegangan luluh. Bila selama proses anil benda kerja tidak didukung secara benar dapat terjadi distorsi.

Baja austenitic tidak rentan terhadap retak hidrogen, karena itu *pre - heating* jarang diperlukan, kecuali untuk mengurangi risiko penyusutan ketebalan. Perlakuan panas pasca pengelasan tidak diperlukan karena material ini tahan terhadap patah getas, kecuali untuk mengurangi resiko korosi retak tegang. Disamping itu perlakuan panas pada *Austenitic Stainless Steel* berpotensi menyebabkan sensitisasi.

Penelitian pengaruh temperatur tinggi pada pengelasan *Stainless Steel* 304 terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik material dilakukan oleh Subodh Kumar, A.S. Shahi (2011).

Pengelasan dilakukan dengan menggunakan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan variasi energi panas input: energi panas rendah (2,563 kJ /mm) , energi panas sedang (2,784 kJ /mm) dan energi panas tinggi (3,017 kJ /mm). Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tarik tertinggi terjadi pada input energy panas terendah. Hal ini berhubungan dengan pertambahan panjang *dendrite* dan jarak spasi antar *dendrite* yang diakibatkan oleh peningkatan input energi panas. Peningkatan panas input juga menyebabkan peningkatan perbesaran butir (*grain coarsening*). Perbesaran butir pada daerah lasan dan HAZ juga terjadi pada penelitian sifat mekanik dan mikrostruktur pengelasan Baja AISI 304 yang dilakukan oleh Mohd Shukor Salleh (2011)

Pengembangan model matematik untuk memprediksi pengaruh perpindahan panas terhadap tegangan pada pengelasan AISI 304 dilakukan oleh Choi (2002). Pengembangan model matematik dilakukan melalui pengkajian proses solidifikasi berdasar Hunt-Trivedi model. Penelitian ini juga berupaya membangun model hubungan antara mikrostruktur dan tegangan sisa yang terjadi. Hubungan antara keduanya sangat bermanfaat bagi evaluasi inisiasi retak dan propagasi retak pada proses pengelasan GMAW. Hubungan antara parameter pengelasan dengan distribusi temperature, mikrostruktur dan tegangan ditampilkan dalam gambar berikut ini:

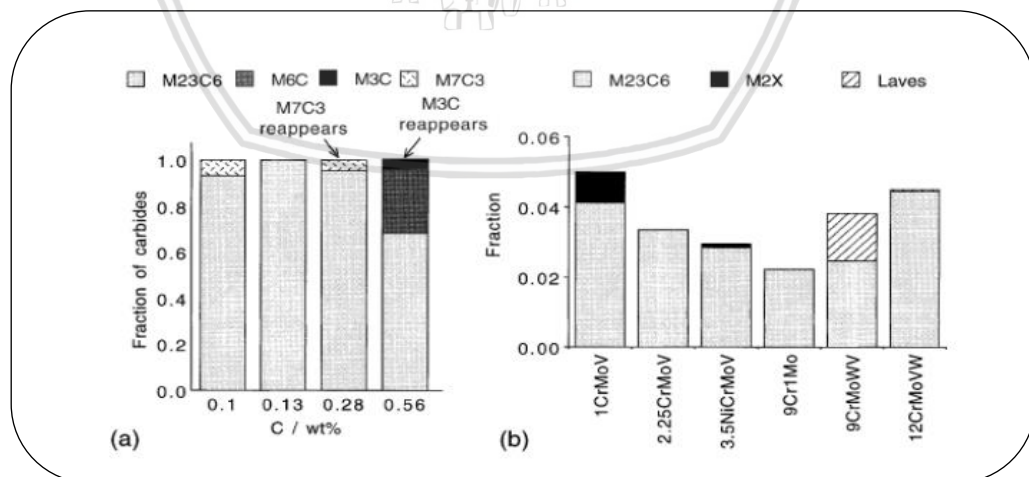


Gambar 2.9. Hubungan antara Parameter Pengelasan dengan Distribusi Suhu, Mikrostruktur dan Tegangan (Sumber: Choi, 2002)

2.3.2. Sensitisasi pada Pengelasan *Austenitic Stainless Steel*

Kandungan Cr sebesar lebih dari 10.5 % menyebabkan Baja AISI 304 memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan korosi, namun ketika dalam proses pembuatannya menggunakan carbon tinggi, saat pendinginan baja ini akan memiliki 'kelebihan' carbon. Kelebihan carbon berikatan dengan Cr membentuk *Chromium Carbide*. Apabila saat proses pengerjaan atau penggunaannya baja AISI 304 mengalami pemanasan di atas 500° C, *Chromium carbide* akan luruh ke batas butir. Peristiwa peluruhan akibat pemanasan pada kasus ini biasa disebut *sensitization* atau *weld decay* (T.G. Gooch, 1971). *Weld decay* bisa mengurangi kandungan logam lebih dari 35% (Goldschmidt, 1948), bahkan Philibert, 1961 menemukan kandungan 45 % Fe pada Fe-18wt%Cr-8wt%Ni berkurang menjadi tinggal 24%. Akibat dari peluruhan ini baja AISI 304 akan kehilangan ketahanan korosinya bila kandungan Cr berkurang hingga di bawah 10.5%. Oleh karena itu, pada pengelasan *Stainless Steel* disarankan untuk menggunakan input panas rendah dan membatasi suhu interpass maksimum sekitar 175 °.

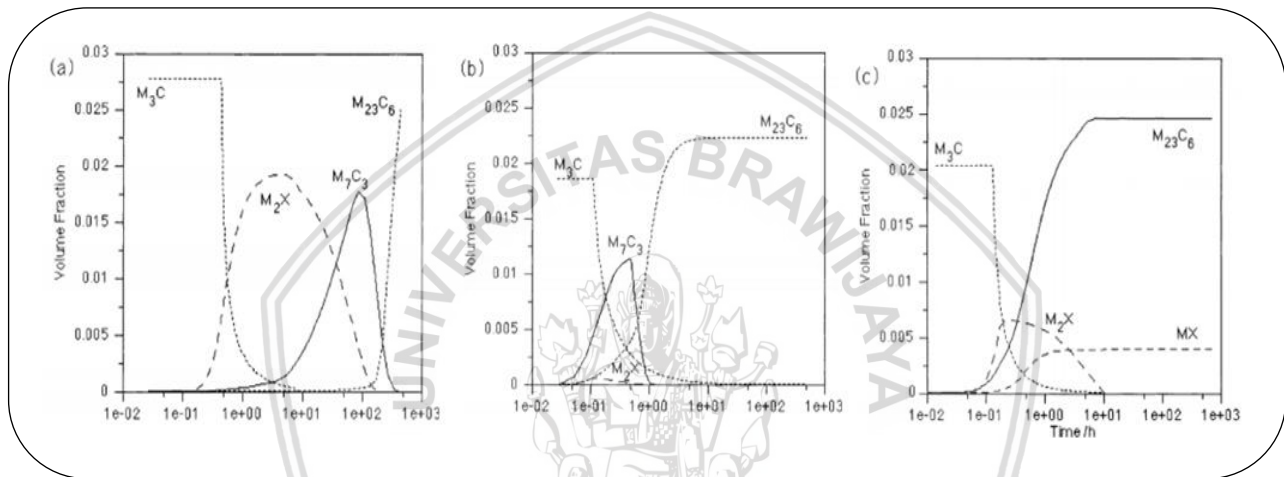
Phase precipitate yang mungkin muncul pada penggunaan baja tahan karat untuk aplikasi suhu tinggi antara lain: grahite, M₂X, M₆C, M₂₃C₆, M₇C₃. Sebagian dari *phase precipitate* tersebut pada kondisi *metastable*. Akibat mudahnya ternukleasi *phase precipitate* di atas menjadi stabil selama digunakan. *Phase precipitate* menentukan bentuk mikrostruktur dan krusial terhadap *creep strain* (Bhadesia, 2001).



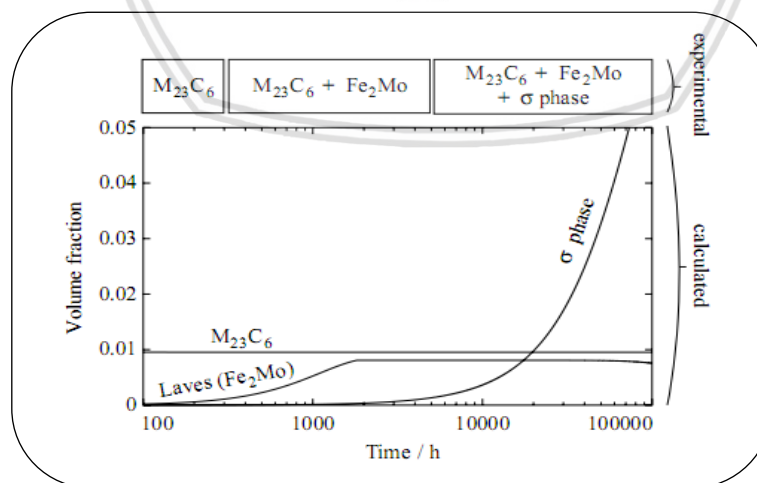
Gambar 2.10. Precipitat pada Kondisi *Equilibrium*
(Sumber: Song You Young, 2010)

Dari sekian banyak *phase precipitate* yang berpeluang terjadi pada aplikasi suhu tinggi, karbida $M_{23}C_6$ paling dominan muncul pada kondisi *equilibrium* seperti ditampilkan pada Gambar 2.10.

Gambar 2.11. menunjukkan perbedaan komposisi baja mempengaruhi keberadaan $M_{23}C_6$ tetapi karbida ini tetap menjadi *precipitate* dominan (Bhadesia, 2001) sementara Gambar 2.12. (Minarni, 1986) menunjukkan hasil hitungan serta eksperimen evolusi fraksi *volume* pada baja AISI 316 dengan suhu 700°C .



Gambar 2.11. *Predominant Precipitate* $M_{23}C_6$ pada Berbagai Komposisi (Sumber: Robson, 1997)

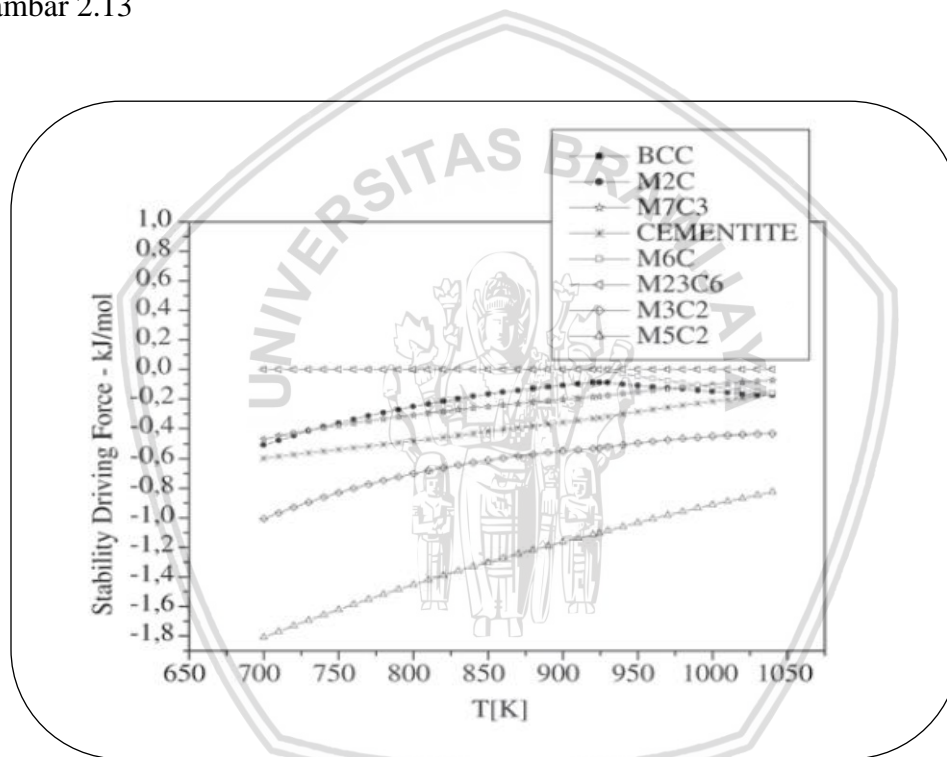


Gambar 2.12. Evolusi *Fraksi Volume* pada Baja AISI 316 dengan Suhu 700°C (Sumber: Minarni, 1986)

Sebagai karbida dominan dapat diduga $M_{23}C_6$ memiliki peran penting terhadap mekanisme *creep*. Precipitat karbida $M_{23}C_6$ yang terbentuk pada batas butir utama *austenite* menjadi kasar dan sangat mudah berubah menjadi retak (Bhadesia, 2001)

Apabila sebelumnya tidak ada karbida pada baja, secara berurutan pembentukan karbida pada rentang suhu 700 – 1040 K adalah sebagai berikut: $M_2C \rightarrow M_3C_2 \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_3C \rightarrow M_6C \rightarrow M_5C_2$.

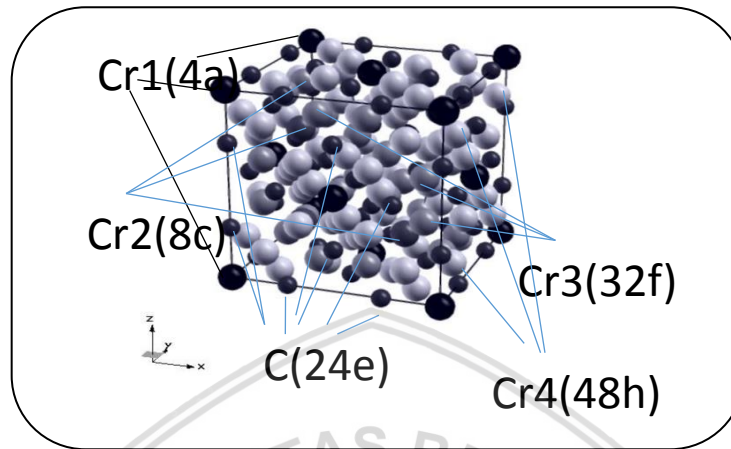
Pada matrix ferrite, phase $M_{23}C_6$ dan M_6C secara thermodinamik stabil sampai dengan suhu 925 K. Di atas temperature ini hanya karbida $M_{23}C_6$ yang tetap stabil seperti ditampilkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13. *Driving Force* Kondisi Stabil Karbida pada *Stainless Steel*
(Sumber: Bojan A. Marinkovic, 2002)

Struktur Kristal $Cr_{23}C_6$ berupa *face centered cubic* (FCC) dengan spacegroup $Fm\bar{3}m$ memiliki 92 atom Chromium pada lokasi: Cr1(4a), Cr2(8c), Cr3(32f) dan Cr4(48h) *symmetry* sites serta 24 atom carbon pada C(24e) site (Meinhardt, 1962). Pada tahun 1972 Bowman et al. mengkonfirmasi kebenaran struktur tersebut dan menggunakan difraksi sinar neutron pada sampel serbuk untuk mendapatkan posisi atom secara lebih presisi sebagai berikut: Cr1(4a) pada

(000), Cr2(8c) pada $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$, Cr3(32f) pada (xxx) dan Cr4(48h) pada (0xx). Bentuk struktur dan posisi atom ditampilkan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Struktur dan Posisi Atom Cr₂₃C₆
(Sumber: Bowman, 1972)

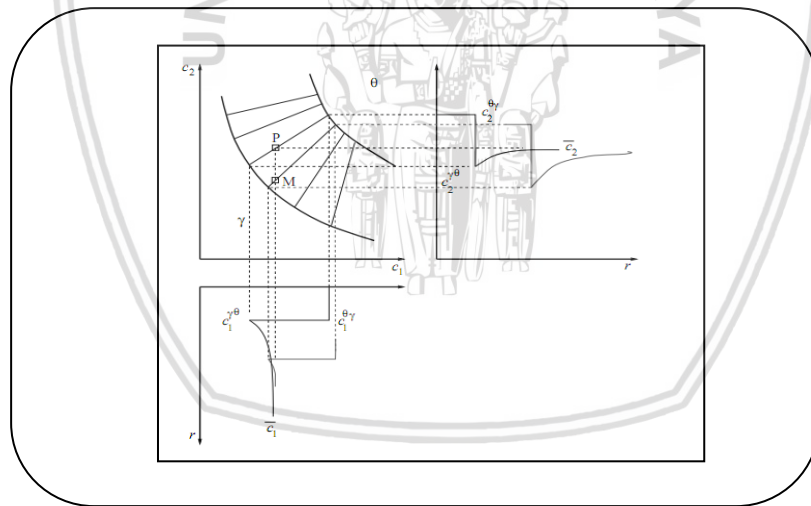
Dari hasil penelitian diperoleh dimensi *lattice* pada T = 293 K sebesar 10.66 (Westgren, 1933; Meinhardt, 1962; Bowman, 1972; Samson, 1953; Yakel, 1987). Hasil penelitian *atomistic* pada Cr₂₃C₆ terbaru (Xie, 2005; Xie, 2006; Santos, 2007; Jiang, 2008; Henriksson, 2008) seperti ditampilkan dalam Table 2.1 menunjukkan kesesuaian dengan penelitian terdahulu.

Tabel 2.1. Hasil Penelitian *Lattice Parameter* Berbagai Karbida
(Sumber: Song You Young, 2010)

	<i>a</i> / Å	<i>B</i> / GPa	Reference
Cr ₂₃ C ₆	10.66		*[Yakel, 1987]
	10.90	275	[Xie <i>et al.</i> , 2005]
	10.56	294	[Henriksson <i>et al.</i> , 2008]
	10.53	298	[Jiang, 2008]
FeCr ₂₂ C ₆	10.65		*[Villars and Calvert, 1991]
	10.90	278	[Xie <i>et al.</i> , 2005]
Fe ^{4a} Cr ₂₂ C ₆	10.55		[Henriksson <i>et al.</i> , 2008]
	10.65		*[Villars and Calvert, 1991]
Fe ₂ Cr ₂₁ C ₆	10.88		[Xie <i>et al.</i> , 2005]
	10.62		*[Villars and Calvert, 1991]
Fe ₄ Cr ₁₉ C ₆	10.82		[Xie <i>et al.</i> , 2005]
	10.63	276	[Xie <i>et al.</i> , 2006]
Fe ₂₃ B ₆	10.62		[Ohodnicki, 2008]

Pembentukan *Chromium Carbide* terjadi melalui proses *nucleation*, *growth* dan *coarsening* phase kedua. *Nucleation* adalah process pembentukan cluster pada phase keseimbangan baru ketika energi system melampaui '*nucleation energy barrier*'. Studi berkaitan dengan *nucleation* dilakukan melalui beberapa pendekatan yaitu: *phenomenological approach*, *kinetic approach* dan *microscopis (molecular) approach*.

Phenomenological approach berfokus pada upaya untuk mendapatkan harga energi bebas pembentukan *small cluster* menggunakan kuantitas makroskopis (tegangan permukaan, *density* dll.). *Classical Nucleation Theory* (Volmer, Weber dan Farkas, 1927) dan modifikasinya (Becker dan Doring, 1935) menggunakan pendekatan ini. Studi terkini untuk mendapatkan model presipitasi simultan pada *Stainless Steel* menggunakan pendekatan *Classical Nucleation Theory* sukses digunakan untuk memprediksi *transient phase* yang teramati tapi tidak dapat diprediksikan pada penghitungan kondisi setimbang. (Sourmail, 2003). Pada Gambar 2.15. terlihat pada kondisi setimbang *flux balance* tidak sinkron dengan *mass balance* menunjukkan perlunya mempertimbangkan phase transient dalam reaksi presipitasi pada *Stainless Steel*.



Gambar 2.15. *Flux Balance* dan *Mass Balance* pada Kondisi Setimbang
(Sumber: Sourmail, 2003)

Pada *Classical Nucleation Theory* laju nukleasi dipengaruhi oleh *liquid instability* dan *diffusion effect*. Laju nukleasi dapat dihitung menggunakan rumus:

$$I = N \exp \left(- \frac{\Delta G^*}{RT} \right) v \exp \left(- \frac{Q_d}{RT} \right) \quad (2-1)$$

dengan :

I : nucleation rate (nuclei per unit volume per detik)

N : number density of nucleation site

ΔG^* : nucleation activation energy

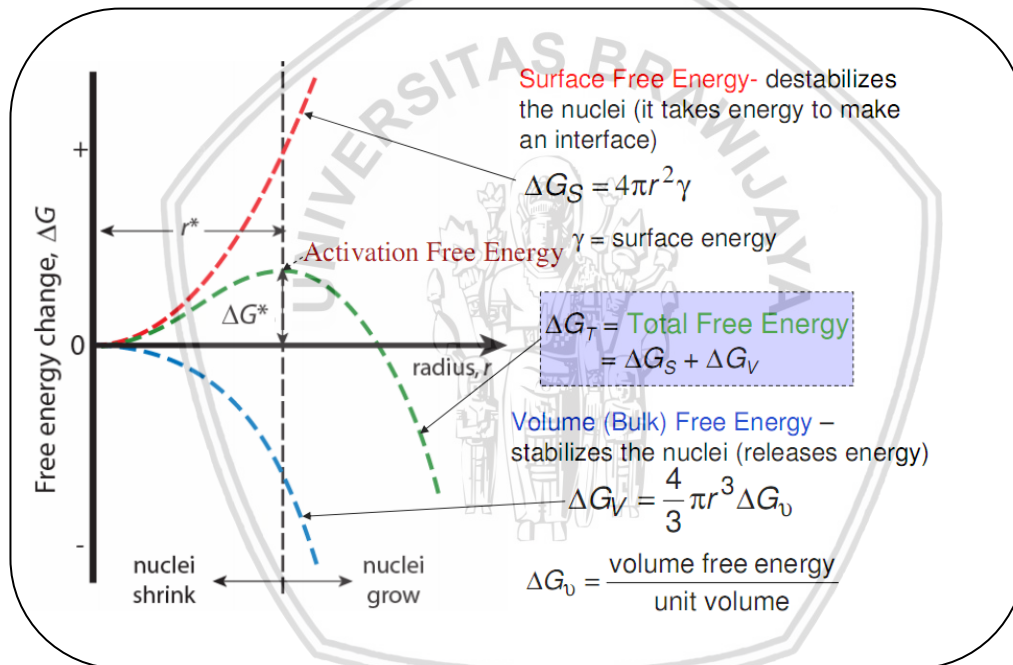
R : gas constant

T : absolute temperature

ν : attempt frequency: kT/h

Q_d : the activation energy for the transfer of atoms across the interface.

Profil perubahan energy bebas nukleasi homogen ditampilkan pada Gambar 2.16



Gambar 2.16. Perubahan Energy Bebas Nukleasi Homogen
 (Sumber: Callister, 2003)

Total Free Energy pada proses *nucleation* merupakan jumlahan *volume free energy* dengan *surface free energy* seperti ditampilkan pada persamaan berikut ini:

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2-2)$$

dengan :

ΔG : total energy bebas nukleasi

ΔG_v : *free energy volume*

r : radius nucleus

γ : *surface energy*

Harga energi aktivasi ditentukan dengan persamaan:

$$G^* = \frac{16\pi \gamma^3}{3 \Delta G_v^2} \quad (2-3)$$

dengan:

G^* : *activation energy*

γ : *surface energy*

ΔG_v : *free energy volume*

Kuantitas energi pembentukan Cr₂₃C₆, FeCr₂₂C₆ dan Fe₂₃C₆ hasil penelitian beberapa peneliti (Kleykamp, 2001 ; Sandberg et al., 2008 ; Jiang, 2008 ; Henriksson et al. 2008 ; Guillermet and Grimvall, 1992) tercantum pada Tabel 2.2. berikut ini:

Tabel 2.2. Energi Pembentukan Karbida

(Sumber: Song You Young, 2010)

	ΔH / kJ atom ⁻¹ mol ⁻¹	Reference
Cr ₂₃ C ₆	-10.98	*[Kleykamp, 2001]
	-8.18	[Sandberg <i>et al.</i> , 2008]
	-9.65	[Jiang, 2008]
	-8.75	[Henriksson <i>et al.</i> , 2008]
Fe ^{4a} Cr ₂₂ C ₆	-10.65	[Henriksson <i>et al.</i> , 2008]
Fe ₂₃ C ₆	11.98	*[Guillermet and Grimvall, 1992]
	4.39	[Sandberg <i>et al.</i> , 2008]

Berbeda dengan *phenomenological approach*, *Kinetic approach* digunakan untuk menghitung laju *nucleation* tanpa estimasi energi bebas pembentukan *small cluster*. Pendekatan microscopis dilakukan dengan menggunakan simulasi computer dan *Density Functional Theories*.

2.4. Energi Impak dan Ketangguhan Retak pada Pengelasan *Stainless Steel*

Ferit dalam jumlah sedikit sangat diperlukan pada pengelasan *Stainless Steel* untuk mencegah pembentukan senyawa pada titik lebur rendah seperti FeS dan FeP yang memicu *hot cracking* pada *Austenitic Stainless Steel*, namun ferit dalam jumlah besar menurunkan ketangguhan material (Steve Kane, 1992). Penelitian yang dilakukan oleh Read, Mc Henry, Steinmeyer (1980) menunjukkan hal yang sama. Pada suhu 76 K Peningkatan *delta ferrite* menurunkan secara tajam energi impak charpy dan ketangguhan retak material.

Kegagalan *Austenitic Stainless Steel* biasa terjadi akibat retak ulet yang ditandai dengan pembentukan dan pertumbuhan void yang pada akhirnya membentuk permukaan retak. Oleh karenanya peningkatan ketangguhan material dapat dilakukan dengan cara meningkatkan ketahanan logam lasan terhadap nukleasi dan pertumbuhan void (Steve Kane, 1992).

Pertumbuhan dan peleburan void berhubungan dengan kekuatan, keuletan dan perilaku strain hardening dari *matrix austenite*. Ketika kekuatan matrix meningkat, energi yang dapat diserap oleh deformasi plastis selama pertumbuhan void lebih sedikit sehingga mengurangi ketangguhan material. Data pengujian menunjukkan ketangguhan material las pada pengelasan *Austenitic Stainless Steel* dapat ditingkatkan sampai mendekati ketangguhan material induk (*wrought Stainless Steel*) dengan cara mengurangi *delta ferrite* dan lebar *columnar grain* serta menghindari pembentukan kromium karbida.

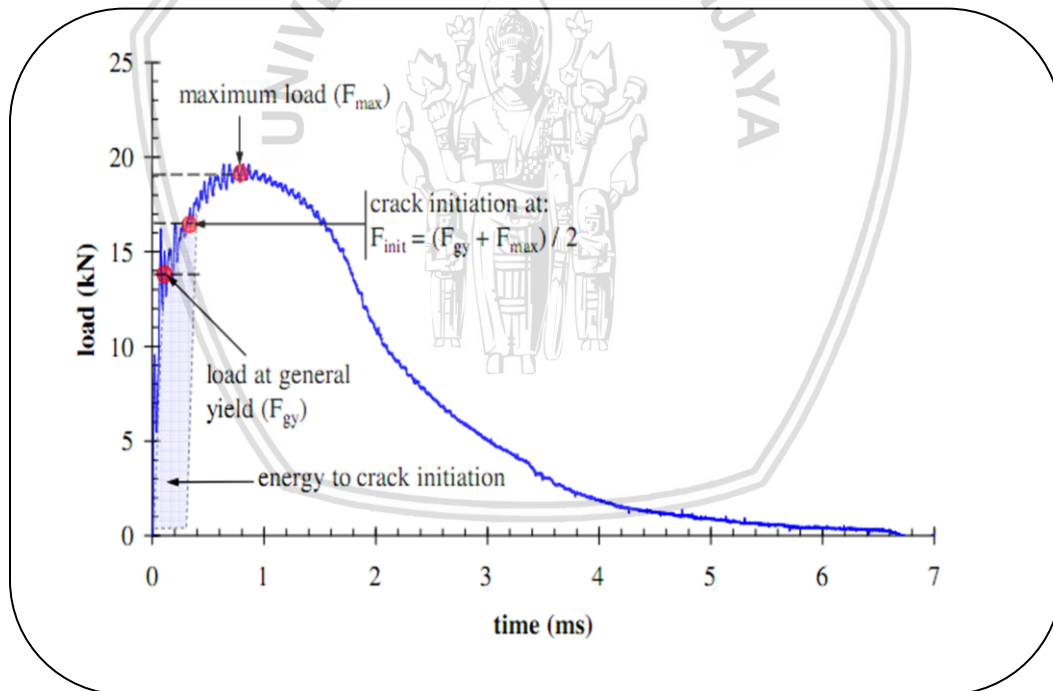
Ketangguhan material biasa diukur dengan kemampuan material menyerap energi atau ekspansi lateral pada uji impak Charpy. Dibandingkan dengan pengujian ketangguhan retak yang memerlukan retak awal dan instrumentasi lebih rumit, uji impak charpy relatif lebih mudah dan murah dilakukan. Meski demikian beberapa kelemahan hasil uji impak charpy perlu menjadi pertimbangan.

Kelemahan pertama disebabkan oleh kecilnya specimen uji. Batasan yang bisa dikembangkan dalam spesimen sangat mungkin terbatas. Hal ini dapat menyebabkan prediksi nilai ketangguhan dan perilaku transisi material tidak wajar.

Kelemahan kedua uji impak Charpy yaitu ketidakmampuan uji ini secara langsung membedakan penyerapan energi saat inisiasi retak dan penyerapan energi selama propagasi retak. Meskipun demikian beberapa penelitian (Fabry, 1993; Viehrig, 2000; Lenkey, 2001) telah memverifikasi secara eksperimental dengan berbagai teknik bahwa retak akan terjadi saat pembebanan berada di antara *general yield load* (F_{gy}) dengan *maximum load capacity* (F_{max}) dan memenuhi persamaan :

$$F_{init} = \frac{F_{gy} + F_{max}}{2} \quad (2-4)$$

sehingga dari hasil pengujian impak Charpy V Notch diperoleh besar energi total yang diserap (E_t) terdiri dari energi inisiasi retak (E_i) dan energi propagasi retak (E_p) seperti ditampilkan pada gambar berikut :



Gambar 2.17. Energi Inisiasi Retak dan Energi Propagasi Retak pada Pengujian Impak
(Sumber: Chaouadi, 2003)

Mengingat kelemahan uji impak Charpy, para peneliti tidak langsung menggunakan hasil uji impak Charpy sebagai ukuran ketangguhan retak material. Penelitian yang dilakukan (Borsom, 1975; H.G. Pisarski, 1978; Schindler, 1999; Kapp et al., 1992; Nageswara Rao, 1992; Tarpani, 2003) lebih banyak berupaya mengkaji hubungan antara hasil pengujian impak Charpy dengan ketangguhan retak. Hubungan antara serapan energi pada pengujian *impact V-notch Charpy* dengan *plane strain fracture toughness* pada baja konstruksi dirumuskan secara empiris oleh Barsom (1975) mengikuti persamaan:

$$\frac{(K_{Id})^2}{E} = 5/(\text{CVN}) \quad (2-5)$$

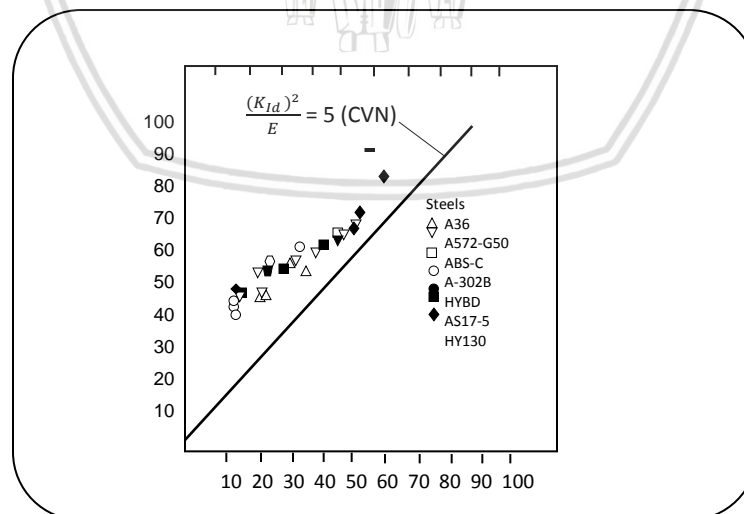
dengan

K_{Id} : *impact plane strain fracture toughness* (ksi $\sqrt{\text{in}}$)

E : modulus elastisitas bahan (ksi)

CVN : *energy absorption* (ft.lbs)

Validasi hubungan berdasar persamaan di atas ditunjukkan oleh data hasil pengujian pada berbagai *grade* baja dengan rentang tegangan yield: 36 ksi sampai dengan 140 ksi seperti ditampilkan pada gambar 2.18. berikut:



Gambar 2.18. Hubungan Serapan Energi dengan
Plain Strain Fracture Toughness pada Pengujian Impak
(Sumber: Barsom, 1975)

Hasil pengujian yang dilakukan oleh Rolfe (1977) menunjukkan hubungan empiris antara ketangguhan retak K_{IC} dengan *upper-shelf Charpy v-notch impact energy absorption* pada baja sesuai dengan persamaan:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = \frac{5}{\sigma_{ys}} \left(CVN - \frac{\sigma_{ys}}{20} \right) \quad (2-6)$$

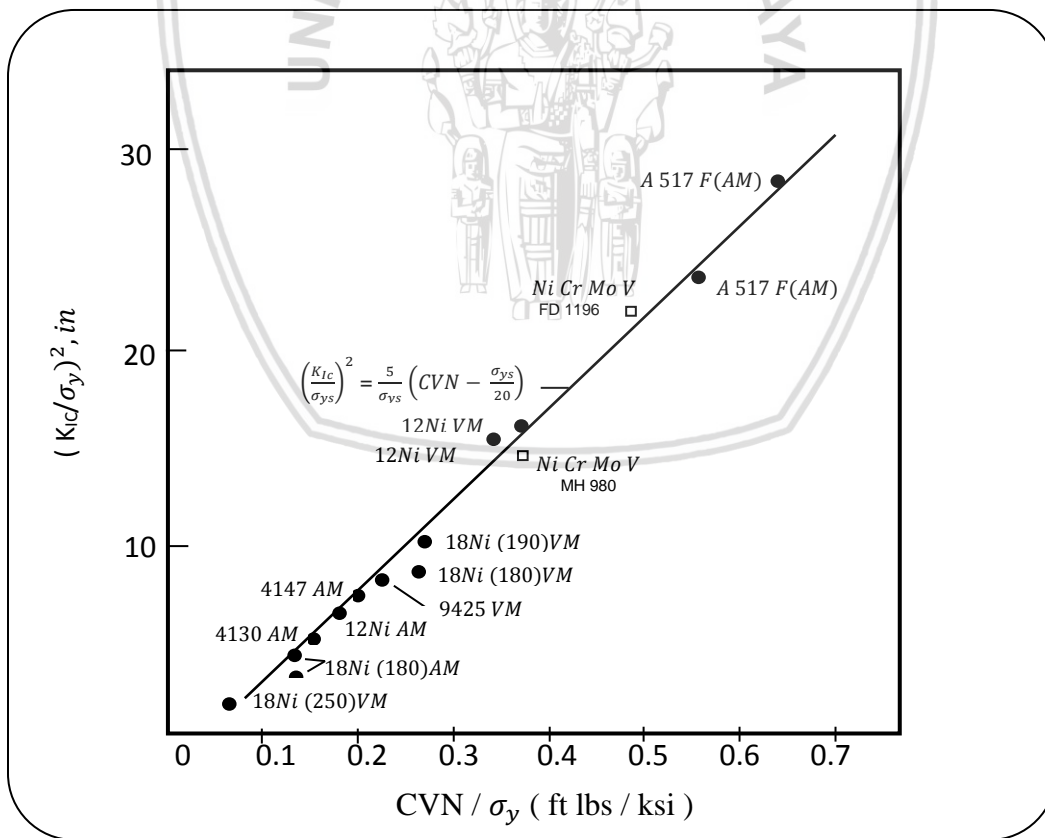
dengan

K_{IC} : ketangguhan retak (ksi \sqrt{in})

σ_{ys} : tegangan *yield* (ksi)

CVN : *energy absorption* (ft.lbs)

Grafik pada gambar 23 di bawah ini menampilkan data hasil pengujian hubungan ketangguhan retak (K_{IC}) dengan *CVN energy absorption*.



Gambar 2.19. Hubungan antara Ketangguhan Retak (K_{IC}) dengan *CVN Energy Absorption*.
(Sumber: Rolfe, 1975)

Sebagian besar formulasi hubungan antara hasil uji impak Charpy dengan ketangguhan retak memiliki rentang aplikasi terbatas mengingat hubungan dibangun berbasis uji empiris yang sangat tergantung dari kondisi saat pengujian (Chauouadi, 2009). Pada tabel 2.3. di bawah ini ditampilkan beberapa formula hubungan antara hasil uji impak Charpy CVN dengan ketangguhan retak K_{IC} dari penelitian terdahulu

Tabel 2.3. Hubungan KIC - CVN

(Sumber: Terán, 2016)

Formula	Units	Equation number
Rolfe-Novak-Barson .		
$(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}})^2 = 0.64(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.01)$	MPa \sqrt{m} , MPa, J	(2-7)
WRC 265		
$(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}})^2 = 0.54(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.02)$	MPa \sqrt{m} , MPa, J	(2-8)
Robert and Newton		
$K_{IC} = 0.804\sigma_{ys} (\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.0098)^{0.5}$	MPa \sqrt{m} , MPa, J	(2-9)
Sailors and Corten		
$K_{IC} = 14.6 (CVN)^{0.50}$	MPa \sqrt{m} , MPa, J	(2-10)
Marandet and Sanz		
$K_{IC} = 19 (CVN)^{0.50}$	MPa \sqrt{m} , MPa, J	(2-11)
INSTA		
$K_{IC} = 12 \sqrt{CVN}$	MPa \sqrt{m} , J	(2-12)

Studi ketangguhan retak pada pengelasan material *Stainless Steel* dengan perkerasan presipitat dilakukan oleh Underwood (1990). Pengukuran dilakukan dengan metode *three point bending* berdasar ASTM E-813. Harga ketangguhan retak J_{IC} diperoleh pada berbagai kondisi pengelasan dan pendinginan. Hasil pengujian juga menunjukkan pada ketangguhan retak rendah retak tidak stabil dengan *cleavage type fracture*.

Kegagalan akibat rendahnya ketangguhan retak sering terjadi pada *duplex Stainless Steel* yang digunakan sebagai bahan bejana tekan. Sieurin (2006) melakukan permodelan distribusi panas dan reformasi *austenite* untuk memverifikasi ketangguhan retak *duplex Stainless Steel* pada *heat affected zone*. Permodelan serupa digunakan untuk evaluasi nukleasi dan evaluasi difusi *phase sigma* selama perlakuan panas *isothermal* atau selama proses pendinginan.

Pada pengelasan *ferrite Stainless Steel type 316 L* tanpa mengandung delta ferrite dengan sedikit variasi konsentrasi nitrogen, ketangguhan retak dipengaruhi oleh parameter pengelasan dan komposisi logam las. Harga ketangguhan retak pada suhu rendah juga berkaitan dengan ukuran butir pada zona fusi. Semakin besar ukuran butir menurunkan ketangguhan retaknya (Whipple, 1981)

Penelitian ketangguhan retak (J_{IC}), dilakukan terhadap *martensitic Stainless Steel* pada *hydraulic turbine runners* (Chen, 2013). Diperoleh harga ketangguhan retak yang terbukti valid pada *compact tension specimen* dengan ketebalan 25.4 mm sesuai dengan standar pengujian ASTM E 1820.

2.5. Mekanika Perpatahan

2.5.1. *Linear Elastic Fracture Mechanics* dan *Elastic Plastic Fracture Mechanics*

Pengaruh pembebanan statik dan dinamik terhadap retak Baja AISI 304 pada daerah sambungan las merupakan salah satu topik retak elastis – plastis. Sejak awal 1980, aplikasi konsep perpatahan elastis-plastis sudah mulai dimanfaatkan di dunia industri (Broek, 1978). Dengan maksud mengetahui perilaku retak dan perambatannya, memprediksi umur retak, menunda kegagalan retak serta pengaruh treatment terhadap retak, para peneliti telah melakukan penelitian perpatahan elastis – plastis dalam berbagai topic sejak tahun 1955 (Broek, 1978). Berbagai penelitian yang dilakukan telah secara nyata memberi kontribusi bagi pengembangan teori retak.

Salah satu konsep penting dan mendasar dalam studi retak adalah retak pada *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM). Pada *Linear Elastic Fracture Mechanics* dikenal konsep *fracture toughness* yaitu harga kritis faktor intensitas tegangan (K) saat retak akan mulai merambat.

Ketangguhan retak bahan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$K_c = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2-13)$$

dengan :

β : faktor bentuk (*dimensionless*)

σ : tegangan

a : panjang retak

Dalam aplikasinya, logam untuk komponen dan struktur akan menghadapi tegangan di atas tegangan yield sehingga mengalami deformasi plastis, akibatnya selalu terjadi daerah plastis di seputar retak yang biasa disebut: *crack tip plastic zone*. Dalam kasus ini analisis retak menggunakan LEFM masih dapat digunakan selama domain K jauh lebih luas dibandingkan zona plastis. Kondisi ini terjadi saat peralihan elastis - plastis dan biasa disebut *Small Scale Yielding* (SSY) . Akurasi penghitungan parameter retak pada kondisi SSY dapat ditingkatkan dengan cara mengakomodasi plastisitas melalui penggunaan panjang retak efektif (a_{eff}). Besar a_{eff} diperoleh dengan cara menambahkan koreksi zona plastis r_p atau r_y pada a . Besar koreksi zona plastis ditampilkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Koreksi Zona Plastis
(Sumber: Schreurs, 2012)

criterion	state	r_y or r_p	$\frac{r_y/r_p}{(K_I/\sigma_y)^2}$
Von Mises	plane stress	$\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.1592
Von Mises	plane strain	$\frac{1}{18\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.0177
Tresca	plane stress	$\frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.1592
Tresca	plane strain $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	$\frac{1}{18\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.0177
Tresca	plane strain $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$	0	0
Irwin	plane stress	$\frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.3183
Irwin	plane strain (pcf = 3)	$\frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{3\sigma_y} \right)^2$	0.0354
Dugdale	plane stress	$\frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2$	0.3927
Dugdale	plane strain (pcf = 3)	$\frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{3\sigma_y} \right)^2$	0.0436

Ketika Plastisitas jauh lebih dominan dibandingkan domain K, kondisi *Small Scale Yielding* tidak lagi bisa digunakan sehingga *Linear Elastic Fracture Mechanics* tidak lagi memadai. Pada kondisi ini untuk menganalisa perilaku retak diperlukan pendekatan *Elastic Plastic Fracture Mechanics* (EPFM).

Pada LEFM dengan pembebanan mode I, besar *J-integral* ekuivalen dengan besar *energy release rate* G sehingga *J-integral* dapat digunakan untuk menentukan kriteria perambatan retak.

$$\text{Plane Stress : } J = \frac{1}{E} K_I^2 \quad (2-14)$$

$$\text{Plane Strain : } J = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2 \quad (2-15)$$

Pada EPFM, *J-integral* berhubungan langsung dengan *crack tip opening displacement* sesuai dengan persamaan (Rice,1968):

$$J = \lambda \sigma_{ys} \text{CTOD} \quad (2-16)$$

2.5.2. Prinsip Keseimbangan Energi Retak.

Pendekatan energi dalam studi retak diprakarsai oleh Griffith (1988). Melalui persamaan dasar energi retak

$$\frac{du}{da} = \frac{dW}{da} \quad (2-17)$$

diperkenalkan konsep *elastic energy release rate* $\frac{du}{da}$ atau G dan *crack propagation energy consumption* $\frac{dW}{da}$ atau R . *Crack propagation* baru akan terjadi bila harga G paling tidak sama dengan harga R . Pada material sangat getas R merupakan energi permukaan, sementara untuk material ulet sebagian besar energi diperlukan untuk pembentukan daerah plastis di ujung retak sehingga R merepresentasi energi plastis. Pada material ulet, energi permukaan relatif kecil dan

dapat diabaikan (Coelho,2009). Pada plat dengan *fixed end*, ketebalan tertentu B dan pembebanan P , *energy release rate* retak G ditampilkan dalam persamaan:

$$G = \frac{d}{dx} (F - U) = \frac{1}{B} \left(P \frac{dv}{da} - \frac{dU_t}{da} \right); \quad (2-18)$$

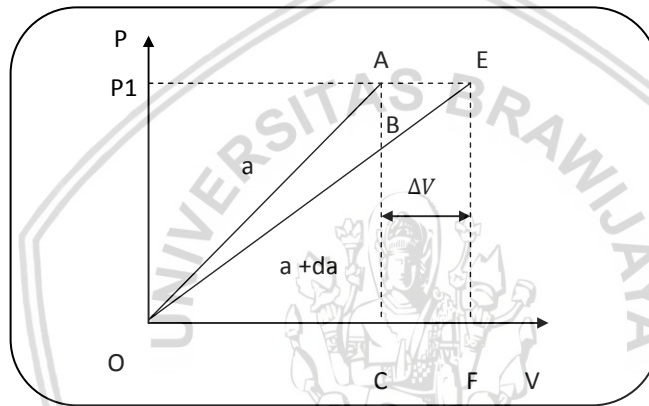
dengan

F : gaya luar

U_t : energi elastis bahan total

v : *displacement*

Harga G juga bisa diperoleh dari *Load Displacement* Diagram sebagai berikut :



Gambar 2.20. Diagram Beban vs *Displacement*
(Sumber: David Broek, 1986)

Usaha yang dilakukan beban sebesar $P\Delta V$ direpresentasi luasan AEFC. Besarnya *elastic energy* meningkat dari OAC menjadi OEF. Energi ini harus dicukupi oleh pembebanan. Harga *Elastic energy release rate* G selalu proporsional dengan $\frac{\sigma^2}{E}$ dan merupakan energi per unit panjang retak atau energi per unit volume dibagi dengan panjang retak dikali tebal. Mengingat G didefinisikan sebagai energi per unit tebal maka harga G selalu proporsional dengan panjang retak sebesar $\frac{\pi\sigma^2 a}{E}$. Dari pengembangan rumus tersebut diperoleh harga G *plane stress* sebesar

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (2-19)$$

dan harga G *plane strain* sebesar:

$$G = (1 - \nu^2) \frac{KI^2}{E} \quad (2-20)$$

Prinsip keseimbangan energi retak yang telah dibahas hanya bisa digunakan pada kasus retak linier elastis. Pada kasus yang melibatkan plastisitas di ujung retak harga G tidak dapat ditentukan dari *elastic stress field*. Eshelby (1956) memperkenalkan konsep *J integral* untuk mengakomodasi kebutuhan energi retak pada daerah plastis. Konsep *J integral* yang didasarkan pada teorema konservasi energi telah di bahas pada bagian terdahulu. Berdasar konsep keseimbangan energi yang telah dipaparkan, penelitian berkaitan dengan upaya untuk mengungkap perilaku retak terus berkembang. Klingbeil (2003) melakukan studi untuk mendapatkan teori baru tentang perambatan retak leleh berdasar total desipasi energi per siklus di ujung retak. Laju perambatan retak leleh pada studi ini di tampilkan dalam formula da/dN sebagai fungsi dari total desipasi energi persiklus dan fungsi ketangguhan retak material *plane stress* atau *plain strain*. Studi berkaitan dengan laju perambatan retak leleh juga dilakukan oleh Pandey dan S. Chand (2003). Pada studi ini model laju perambatan retak leleh dirumuskan berdasarkan kesetimbangan energi selama proses perambatan retak. Peneliti lain yang dilakukan oleh Karel Chobot dan Martin Kraus (2013) bertujuan untuk mengevaluasi disipasi energi deformasi pada saat inisiasi retak. Pada pembebanan statis besar *fracture specivic energy* dua kali lipat energi pembentukan *fracture surface* sementara pada pembebanan dinamis besar *fracture specivic energy* kurang lebih tujuh kali lipat energi pembentukan *fracture surface*.

Pengelasan adalah proses yang melibatkan perpindahan energi, namun penelitian ketangguhan retak yang telah dilakukan pada pengelasan *Stainless Steel* lebih banyak melihat hubungan antar parameter pengelasan dengan ketangguhan retak material. Belum dilakukan studi untuk memprediksi harga ketangguhan retak material berdasarkan ketersediaan dan konsumsi energi pada proses pengelasan. Penelitian ini dilakukan untuk membangun model neraca keseimbangan energi pada pengelasan AISI 304 yang dapat digunakan untuk memprediksi ketangguhan retak kritis K_{IC} dan ketangguhan retak kritis material ulet/ *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}).

BAB III

KERANGKA KONSEP

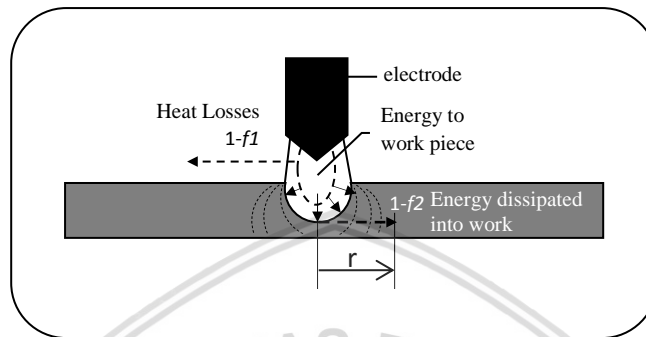
Penelitian ini dimaksudkan untuk mengembangkan model matematik prinsip keseimbangan energi pada prediksi ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada pengelasan Baja AISI 304.

Dalam perspektif termodinamika proses pengelasan dapat dipandang sebagai proses perpindahan energi dari mesin las ke benda kerja dan lingkungan sekitar. Seperti halnya proses termodinamika lainnya pada pengelasan juga terjadi *inefficiency*.

Mekanisme inefisiensi tingkat pertama terjadi saat perpindahan panas dari sumber panas ke permukaan logam. Tingkat *efficiency* pada tahap ini ditentukan oleh faktor perpindahan panas f_1 yang didefinisikan sebagai perbandingan energi panas yang diterima *workpiece* terhadap total energi yang dibangkitkan pada sumber. Mekanisme *inefficiency* tahap ke dua terjadi ketika sebagian panas yang diterima *workpiece* terbuang secara konduktif menjauhi daerah fusi. Tingkat efisiensi tahap ke dua ini ditentukan oleh melting factor f_2 yang didefinisikan sebagai proporsi energi yang digunakan pada proses *melting* terhadap total energi yang diterima *workpiece*. Besar f_2 ditentukan oleh proses pengelasan, *thermal properties* logam, konfigurasi sambungan dan tebal benda kerja. Pada *arc welding* energi panas sebesar $1-f_2$ yang terbuang secara konduktif menjauhi daerah fusi cukup besar bahkan bisa mencapai 60% dari total energi yang diterima oleh benda kerja. *inefficiency* inilah yang perlu diteliti lebih lanjut. Studi ini berupaya untuk mengungkap lebih jauh ‘pemanfaatan’ energi yang terbuang menjauhi daerah fusi pada pengelasan AISI 304.

Dalam perspektif konservasi energi, sejumlah $1-f_2$ energi yang terbuang secara konduktif ke benda kerja tersebut tidak benar-benar terbuang tetapi digunakan sebagai sumber energi pada ‘perubahan’ kondisi butir dan struktur kristal di seputar daerah fusi. Studi ini mengasumsikan peristiwa *grain growth*, rekristalisasi, sensitisasi pada *Stainless Steel* 304 dan pembentukan tegangan sisa pasca pengelasan sebagai dampak langsung perubahan kondisi batas butir dan struktur kristal di sekitar daerah fusi inilah yang memanfaatkan energi tersebut.

Skema dissipasi energi selama proses pengelasan ditunjukkan dalam gambar berikut :

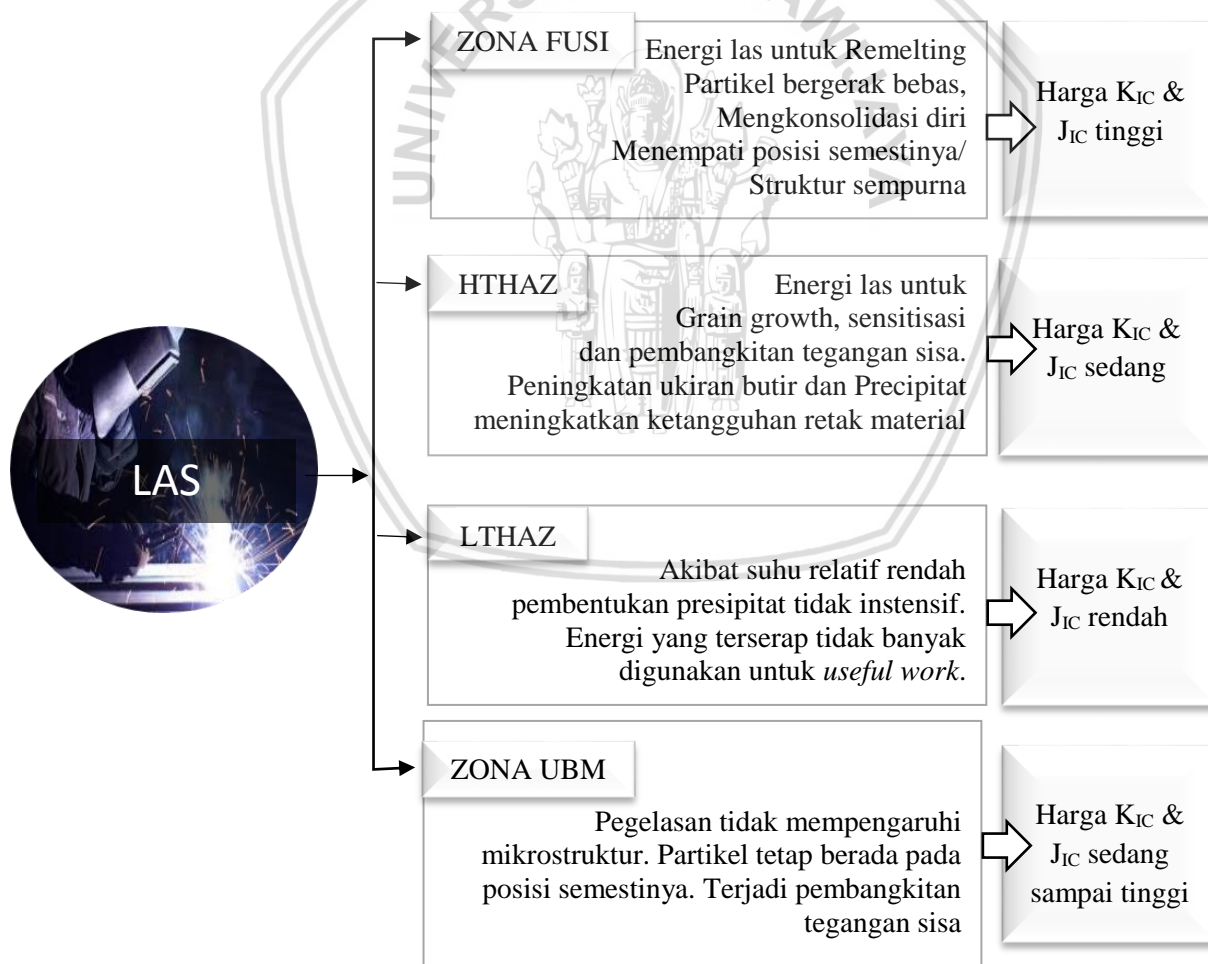


Gambar 3.1. Dissipasi Energi Pengelasan AISI 304

Harga ketangguhan retak (K_{IC}) dan *fracture resistance* (J_{IC}) ditentukan oleh kemampuan/kapasitas material menerima tambahan energi pasca pengelasan. Pada proses pengelasan yang sama, variasi kapasitas material menerima tambahan energi pasca pengelasan dipengaruhi oleh konsumsi energi pada setiap zona. Pada zona las, energi pengelasan dikonsumsi oleh peristiwa *remelting*. Proses ini memerlukan energi cukup besar untuk membuat partikel pada *phase* padat yang diam menjadi bebas bergerak. Ketika bergerak partikel/atom secara alamiah akan menuju *level* energi terendah dan menkonsolidasi diri menempati posisi pada struktur yang semestinya. Struktur yang kembali sempurna memiliki kemampuan lebih besar untuk menerima tambahan energi akibat pembebanan. Dapat di duga zona las pasca pengelasan memiliki harga ketangguhan retak dan *fracture resistance* lebih tinggi dibanding zona lainnya.

Pada zona HTHAZ suhu tidak lagi setinggi pada zona las, energi yang diterima material pada zona ini juga tidak sebesar energi yang diterima pada zona las dan tidak cukup untuk membuat partikel bergerak bebas namun tetap bergetar. Energi pengelasan digunakan untuk pertumbuhan butir dan pembangkitan tegangan sisa. Suhu pada zona ini masih cukup tinggi untuk memicu pembentukan presipitat. Harga ketangguhan retak material pada zona HTHAZ diperkirakan cukup tinggi mengingat peningkatan ukuran butir pada zona dengan ukuran butir besar dan kehadiran precipitat menghambat dislokasi dan meningkatkan harga ketangguhan

retak material pada zona ini. Akibat suhu tidak terlalu tinggi partikel pada zona LTHAZ tidak lagi bergetar sehebat getaran partikel pada zona HTHAZ. Ketika pembentukan precipitat kurang intensif dan energi pengelasan yang terserap tidak banyak dikonsumsi oleh *useful work*, maka kemampuan material menerima energi berkurang sehingga harga ketangguhan retak material pada zona ini kemungkinan rendah. Pada zona *unaffected base metal* energi pengelasan tidak mempengaruhi mikrostruktur. Seperti halnya pada zona las, partikel/ atom pada zona ini berada pada posisi semestinya sehingga harga ketangguhan retak pada zona ini kemungkinan relatif lebih tinggi dibanding zona HTHAZ dan LTHAZ. Gambar 3.2 di bawah ini memberikan gambaran pengaruh pengelasan terhadap harga ketangguhan retak material pada zona fusi, HTHAZ, LTHAZ dan *unaffected base metal*.

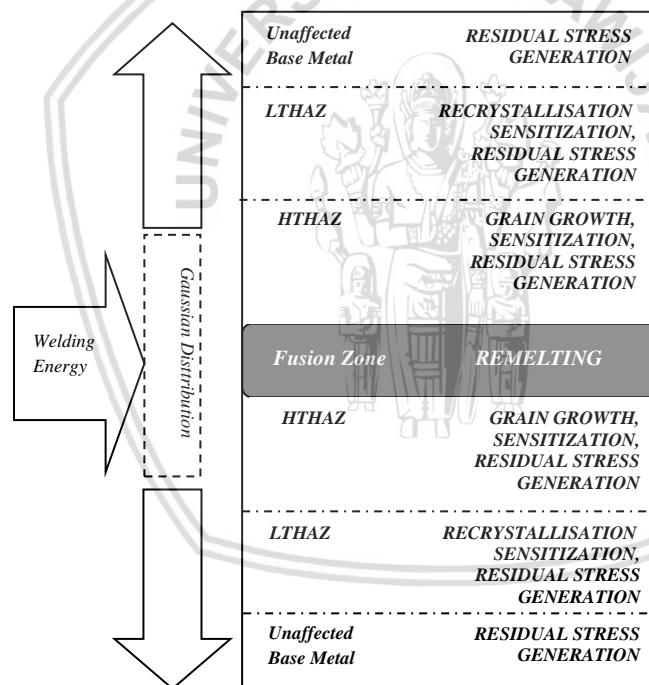


Gambar 3.2. Pengaruh Pengelasan pada Prediksi Ketangguhan Retak Material pada Setiap Zona

Pada bagian pertama, penelitian berupaya mengungkap neraca keseimbangan energi pada pengelasan Baja AISI 304. Input energi pengelasan per satuan waktu menurut E. Ranjbarnodeh (2012) sebesar :

$$Q = \frac{\eta \cdot I \cdot V}{S} (3-1)$$

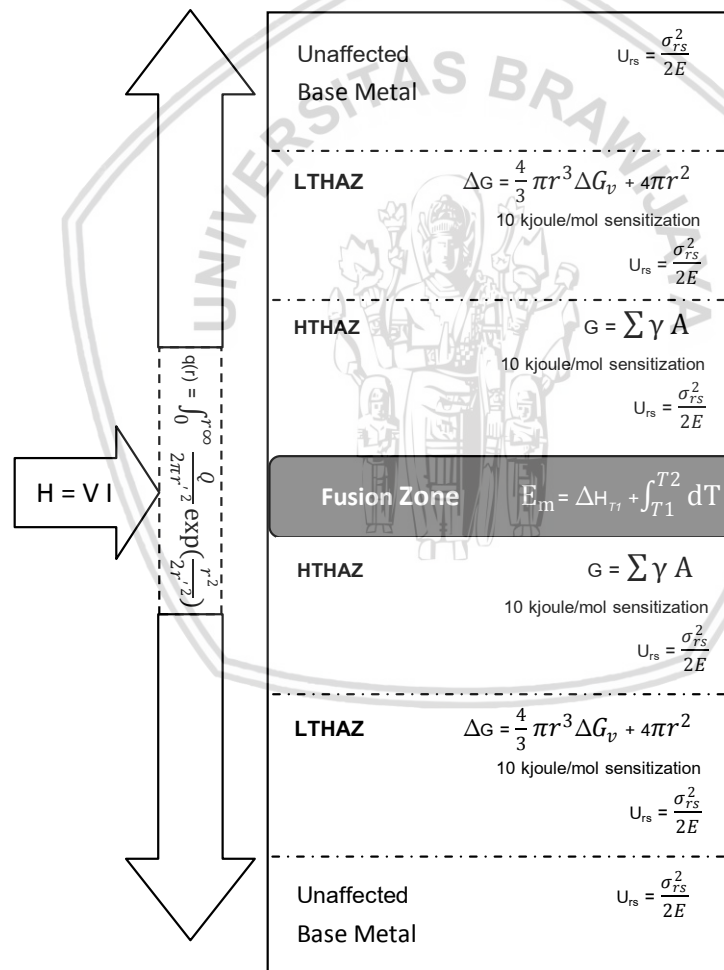
dengan I: arus pengelasan, V: tegangan pengelasan, η : *efficiency* pengelasan dan S: kecepatan pengelasan akan terdistribusi di sekitar sambungan las. Dissipasi energi pengelasan di tampilkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Proses yang Mengkonsumsi Energi Pengelasan AISI 304

Konsep yang digambarkan dalam diagram di atas adalah input energi pengelasan setelah dikurangi *inefficiency* pengelasan akan dimanfaatkan sebagai sumber energi pada peristiwa: *remelting/solidifikasi*, pertumbuhan butir (*grain growth*), rekristalisasi (*recrystallisation*), sensitisasi (*sensitisation*) dan pembangkitan tegangan sisa (*residual stress*)) yang pada akhirnya akan mempengaruhi kebutuhan energi retak pada setiap zona dan subzona.

Secara lengkap peta distribusi suplai energi dan peta konsumsi energi pada setiap zona ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Distribusi Suplai Energi Pengelasan

Distribusi suplai energi pengelasan dihitung menggunakan pendekatan Gaussian mengikuti formula:

$$q(r) = \int_0^{r^\infty} \frac{Q}{2\pi r' r'^2} \exp\left(-\frac{r'^2}{2r'^2}\right) \quad (3-2)$$

dengan:

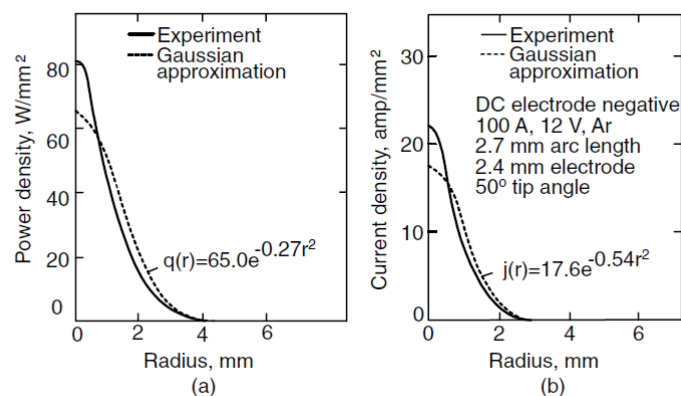
$q(r)$: energi pada jarak r dari pusat sumber panas

Q : input energi pengelasan

r' : parameter distribusi Gaussian

r : jarak dari pusat sumber panas

Sebagian besar penelitian tentang perpindahan panas selama proses pengelasan yang telah dipublikasikan mengasumsikan sumber panas terkonsentrasi pada volume kecil dari material. Hasil analisis yang dibangun berdasar asumsi sumber panas terkonsentrasi memiliki kelemahan *infinite temperatur level* pada pusat sumbu sumber panas akibat singularitas padahal faktanya panas sumber juga terdistribusi pada region dengan pola tertentu. Studi terdahulu telah membuktikan hasil pengukuran pada zona fusi dan zona HAZ berbeda dengan hasil analisis menggunakan pendekatan sumber panas terkonsentrasi. Konsep sumber panas terkonsentrasi hanya akurat pada suhu tidak lebih dari dua puluh persen suhu *melting* material (Iacobescu, 2006). Salah satu model yang dibangun dengan konsep panas sumber terdistribusi adalah pendekatan distribusi Gaussian. Dibandingkan dengan model yang berbasis panas sumber terkonsentrasi pendekatan distribusi Gaussian memberikan hasil lebih akurat pada prediksi distribusi panas selama proses pengelasan (Iacobescu, 2006).



Gambar 3.5. Pendekatan Distribusi Gaussian pada Distribusi Energi Pengelasan

Energi panas yang dipasok selama proses pengelasan pada zona las digunakan untuk *remelting* dan solidifikasi material las. Konsumsi energi per gram material pada zona ini dapat dihitung menggunakan rumus (Niles, 1975):

$$E_m = \Delta H_f + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (3-3)$$

dengan :

E_m : Energi yang diperlukan untuk *remelting* 1 gram material (Joule/gram)

ΔH_f : panas laten fusi (kalori/mol)

C_p : *specific heat* (kalori/mol)

T_1 : Temperatur awal (Kelvin)

T_2 : Temperatur pengelasan (Kelvin)

Energi panas pada subzona HTHAZ digunakan untuk pertumbuhan butir (*grain growth*) dan besarnya per unit volume dapat dihitung dengan rumus (Thompson, C.V., 1990):

$$E_{gg} = \frac{3\gamma}{D} \quad (3-4)$$

dengan

γ : energi batas butir per unit luas (joule/cm²)

D : diameter butir (cm)

Pada zona ini terjadi juga peristiwa sensitisasi yaitu pembentukan Karbida Kromium. Dari penelitian terdahulu (Kleykamp, 2001; Sandberg, 2008; Jiang, 2008; Henriksson, 2008; Guillernet, 1992) proses sensitisasi mengkonsumsi energi sebesar -10.98 kJoule atom⁻¹mol⁻¹ sampai dengan -8.75 kJoule kJoule atom⁻¹mol⁻¹.

Pembangkitan tegangan sisa sebesar (Callister, 2003):

$$U_{rs} = \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \quad (3-5)$$

dengan

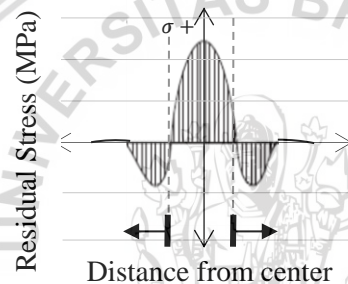
U_{rs} : energi yang dikonsumsi oleh material untuk deformasi elastis

σ_{rs} : tegangan sisa

E : modulus elastisitas.

juga terjadi pada zona HTHAZ dengan profil distribusi tegangan sisa mengikuti formula Masubuchi, 1961 seperti ditampilkan pada persamaan (3-6) dan Gambar 3.6.

$$\sigma(y) = \sigma_{rsmax} \left[1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2 \right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{b}\right)^2\right] \quad (3-6)$$



Gambar 3.6. Distribusi Tegangan Sisa

Pada subzona LTHAZ energi panas pengelasan sebesar :

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (3-7)$$

dikonsumsi oleh peristiwa rekristalisasi. Pada subzona ini juga terjadi peristiwa pembentukan Cr23C6 (*sensitisasi/weld decay*) yang memerlukan energi berkisar antara -10.98 kJoule atom⁻¹mol⁻¹ sampai dengan -8.75 kJoule atom⁻¹mol⁻¹. Konsumsi energi pada peristiwa pembangkitan tegangan sisa pada zona *Unaffected Base Metal* dihitung dengan cara yang sama menggunakan persamaan 7.

Konsep kesetimbangan energi pada pengelasan AISI 304 diperoleh dengan cara membandingkan energi impak bahan sebelum pengelasan yang diperoleh dari uji impak Charpy *V Notch* dengan sisa serapan energi pada setiap zona yang diperoleh dari pengujian *Impact*

Charpy V Notch pasca pengelasan ditambah input energi pengelasan pada setiap zona dikurangi konsumsi energi hasil perhitungan di atas. Secara matematis konsep kesetimbangan termodinamika pada pengelasan AISI 304 ditampilkan dalam persamaan berikut :

$$E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo}) \quad (3-8)$$

dengan :

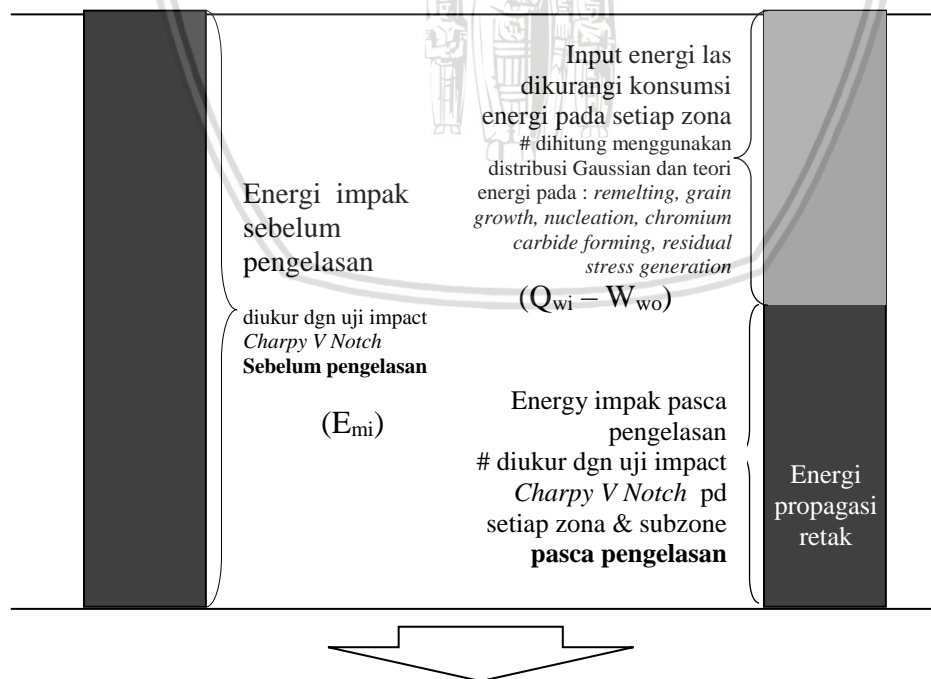
E_{mi} : energi impak sebelum pengelasan

E_{mw} : energy impak pasca pengelasan

Q_{wi} : energy pengelasan

W_{wo} : konsumsi energi pada setiap zona

Secara sederhana neraca keseimbangan energi kesetimbangan energi pada pengelasan AISI 304 ditampilkan dalam Gambar 3.5. berikut:



KESETIMBANGAN ENERGI pada PENGELASAN AISI 304

Gambar 3.7. Kesetimbangan Energi pada Pengelasan AISI 304

Energi pengelasan dari hasil penghitungan menggunakan Persamaan (3-1) terdistribusi ke setiap zona mengikuti pola distribusi Gaussian sesuai Persamaan (3-2). Konsumsi energi pada setiap zona diperoleh dari Persamaan (3-3), (3-4), (3-5) dan (3-7). Profil keseimbangan termodinamika pada setiap zona ditampilkan pada persamaan-persamaan berikut:

❖ *Fusion Zone*

$$E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo})$$

$$E_{mi} = E_{mw} + \left(\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r r^2}\right) - (\Delta H_{TI} + \int_{T1}^{T2} C_p dT) \right) \quad (3-9)$$

❖ *Heat Affected Zone*

○ HTHAZ

$$E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo})$$

$$E_{mi} = E_{mw} + \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r r^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right) \quad (3-10)$$

○ LTHAZ

$$E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo})$$

$$E_{mi} = E_{mw} + \left(\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r r^2}\right) - \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right) \quad (3-11)$$

❖ *Unaffected Base Metal Zone*

$$E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo})$$

$$E_{mi} = E_{mw} + \left(\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r r^2}\right) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \quad (3-12)$$

Kriteria energi retak Griffith menyatakan : perambatan retak akan terjadi apabila tersedia cukup energi untuk pembentukan tambahan retak sebesar da . Kriteria energi retak Griffith pada plat diwakili oleh persamaan :

$$\frac{d}{da} (U - F + W) = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{d}{da} (U - F) = \frac{dW}{da} \quad (3-13)$$

dengan :

U : strain energy

F : work done by external load

W : work expended in fracturing material over da

Pada saat terjadi retak dapat dibuktikan bahwa '*deliverable energy*' akan selalu sama besarnya dengan perubahan *strain energy* dU/da sehingga kriteria energi retak Griffith dapat disederhanakan menjadi : $\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da}$.

Suku sebelah kiri biasa disebut : *strain energy release rate* (G) . Besar energi regangan diekspresikan dengan persamaan (David Broek, 1988):

$$U = U_{body \text{ with no crack}} + U_{due \text{ to crack}} \quad (3-14)$$

Pada plat dengan panjang L , lebar W dan tebal B maka:

$$U_{body \text{ with no crack}} = \frac{\sigma^2}{2E} L.B.W \quad (3-15)$$

$$U_{due \text{ to crack}} : \frac{\sigma^2}{E} B \quad (3-16)$$

Kedua persamaan harus memiliki dimensi yang sama agar dapat dijumlahkan sehingga persamaan $U_{due \text{ to crack}}$ dengan mempertimbangkan panjang retak a disesuaikan menjadi:

$$U_{due \text{ to crack}} = C \frac{\sigma^2}{E} Ba^2 \quad (3-17)$$

Hasil perhitungan menunjukkan besar konstanta $C = \pi$. Persamaan energi regangan menjadi

:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} L.B.W + \pi \frac{\sigma^2}{E} Ba^2 \quad (3-18)$$

$$= \frac{\sigma^2}{2E} L.W + \pi \frac{\sigma^2}{E} a^2 \quad (3-19)$$

Sehingga:

$$\frac{dU}{da} = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (3-20)$$

Suku $\frac{dW}{da}$ biasa disebut : *fracture energy* atau *fracture resistance* (R).

Berdasar formula di atas, persamaan kriteria retak menyatakan bahwa

$$\frac{\pi \sigma^2 a}{E} = R \text{ atau bila } G = R. \quad (3-21)$$

Persamaan di atas juga menunjukkan bahwa kegagalan pada material yang memiliki retak akan terjadi bila: $\pi \sigma^2 a$ mencapai nilai tertentu sebesar: $E.R$. atau ketika ketangguhan retak (*fracture toughness*)

$$K = \sqrt{\pi \sigma^2 a} = \sqrt{E \cdot R}. \quad (3-22)$$

Pada *Elastic Plastic Fracture Mechanics* (EPFM), plastisitas mempengaruhi kebutuhan energi retak. Kriteria retak pada EPFM dinyatakan dalam persamaan :

$$J_{el} + J_{pl} = J_R = \frac{dW}{da} \quad (3-23)$$

atau

$$\frac{\pi \beta \sigma^2 a}{E} + \frac{H \sigma^{n+1} a}{F_p} = J_R \quad (3-24)$$

dengan :

J_{el} : *fracture energy for elastic part*

J_{pl} : *fracture energy for plastic part*

J_R : *fracture energy for EPFM*

β : *geometry factor*

H : *geometry factor*

E : *elastic modulus*

F_p : *plastic modulus*

Baja AISI 304 dikenal sangat ulet. Seperti halnya pada sebagian besar paduan (*alloy*), retak pada Baja AISI 304 melibatkan plastisitas. Pendekatan EPFM lebih sesuai pada analisis retak Baja AISI 304. Pada EPFM energi retak pada pembentukan permukaan retak baru relatif kecil dibanding energi plastis di ujung retak sehingga dapat diabaikan. Dengan mengabaikan suku $\frac{\pi \beta \sigma^2 a}{E}$, kriteria energi retak menjadi:

$$\frac{H\sigma^{n+1}a}{F} = J_R \quad (3-25)$$

Dari hasil pengujian impak Charpy *V Notch* diperoleh nilai total Energi yang diserap oleh bahan sebelum terjadi kegagalan (E_t). Besar energi total yang diserap terdiri dari energi inisiasi retak (E_i) dan energi propagasi retak (E_p):

$$E_t = E_i + E_p \quad (3-26)$$

Beberapa penelitian telah memverifikasi secara eksperimental dengan berbagai teknik bahwa retak akan terjadi saat pembebanan berada di antara *general yield load* (F_{gy}) dengan *maximum load capacity* (F_{max}) dan memenuhi persamaan:

$$F_{init} = \frac{F_{gy} + F_{max}}{2} \quad (3-27)$$

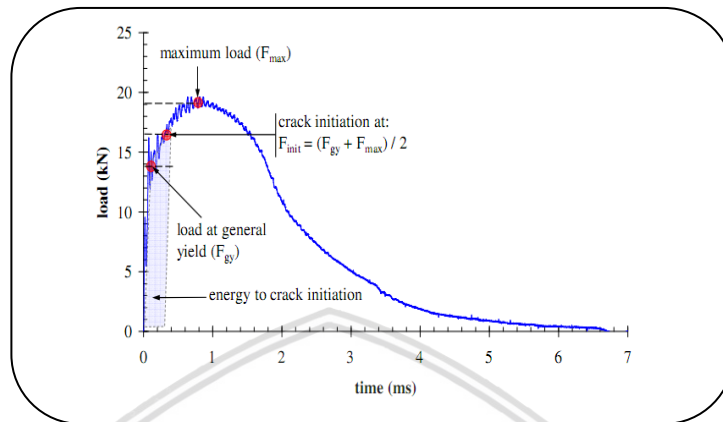
dengan

F_{init} : Beban pada saat inisiasi retak

F_{gy} : Beban *yield*

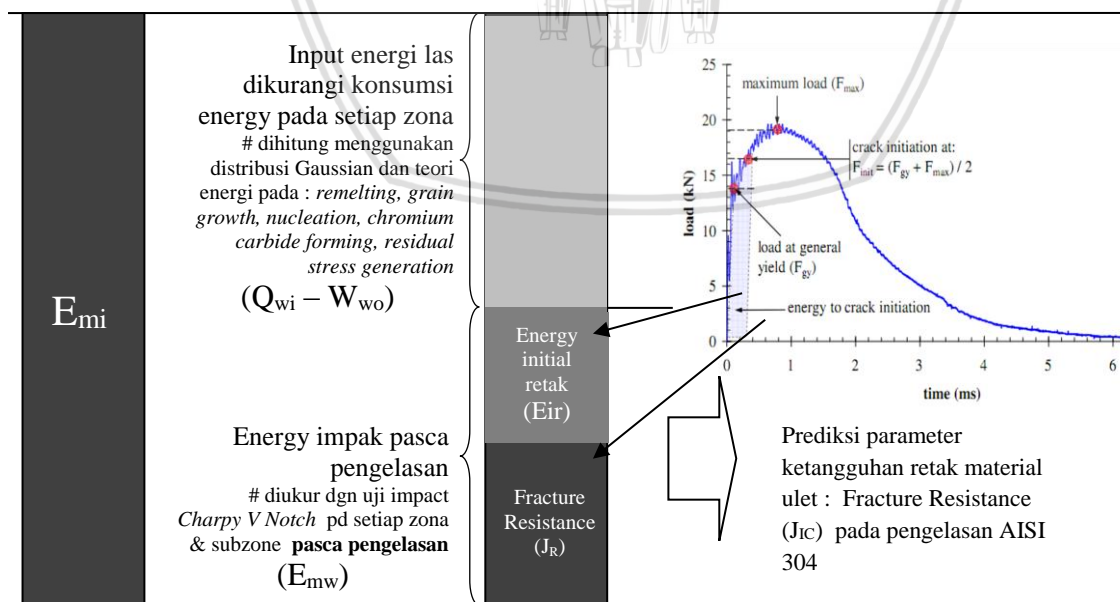
F_{max} : Beban maksimum

Besar F_{init} , F_{gy} dan F_{max} ditampilkan dalam gambar 3.8 berikut :



Gambar 3.8. Time Test Record Charpy Impact Test
(Sumber: Chaouadi, 2003)

Energi pada pengelasan baja AISI 304 setelah dikurangi konsumsi energi pada proses *remelting, grain growth, nucleation, chromium carbide forming, residual stress generation* mengurangi kemampuan material menyerap energi sebelum terjadi retak. Secara sederhana profil energi retak pada pengelasan AISI 304 ditampilkan pada Gambar 3.9. berikut ini:



Gambar 3.9. Konsumsi Energi Retak pada Pengelasan Baja AISI 304

Mempertimbangkan energi pengelasan dan konsumsi energi pasca pengelasan, formula hubungan K_{IC} – CVN pada tabel 2.3. dapat digunakan untuk prediksi *Fracture Toughness* K_{IC} akibat pengelasan pada Baja AISI 304. Substitusi persamaan (3-8) dan (3-9) sampai dengan (3-12) persamaan pada formula hubungan K_{IC} – CVN dalam tabel 2.3 diperoleh prediksi *Fracture Toughness* K_{IC} pada setiap zona sebagai berikut:

Rolfe-Novak-Barson.

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.01\right)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emw}{\sigma_{ys}} - 0.01\right)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emi - (Qwi - Wwo)}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad (3-28)$$

Zona Las

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emi - \left(\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r^2}\right) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} C_p dT)\right)}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad (3-29)$$

Zona HTHAZ

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emi - \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}\right)\right)}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad (3-30)$$

Zona LTHAZ

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emi - \left(\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r^2}\right) - \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}\right)\right)}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad (3-31)$$

Zona UBM

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64\left(\frac{Emi - \left(\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r^2}\right) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}\right)}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad (3-32)$$

WRC 265

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54\left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.02\right)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54\left(\frac{Emw}{\sigma_{ys}} - 0.02\right)$$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54 \left(\frac{Emi - (Qwi - Wwo)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \quad (3-33)$$

Zona Las

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} Cp dT) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \quad (3-34)$$

Zona HTHAZ

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \quad (3-35)$$

Zona LTHAZ

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \quad (3-36)$$

Zona UBM

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \quad (3-37)$$

Robert and Newton

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5}$$

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emw}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5}$$

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emi - (Qwi - Wwo)}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5} \quad (3-38)$$

Zona Las

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emi - \left(\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} Cp dT) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5} \quad (3-39)$$

Zona HTHAZ

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emi - \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5} \quad (3-40)$$

Zona LTHAZ

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emi - \left(\left(\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5}} \right) \quad (3-41)$$

Zona UBM

$$K_{IC} = 0.804 \sigma_{ys} \left(\frac{Emi - \left(\left(\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right)^{0.5} \quad (3-42)$$

Sailors and Corten

$$K_{IC} = 14.6 (CVN)^{0.50}$$

$$K_{IC} = 14.6 (Emw)^{0.50}$$

$$K_{IC} = 14.6 (Emi - (Qwi - Wwo))^{0.50} \quad (3-43)$$

Zona Las

$$K_{IC} = 14.6 (Emi - \left(\left(\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} Cp dT) \right) \right)^{0.50} \quad (3-44)$$

Zona HTHAZ

$$K_{IC} = 14.6 (Emi - \left(\left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right) \right)^{0.50} \quad (3-45)$$

Zona UBM

$$K_{IC} = 14.6 (Emi - \left(\left(\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)^{0.50} \quad (3-46)$$

Marandet and Sanz

$$K_{IC} = 19 (CVN)^{0.50}$$

$$K_{IC} = 19 (Emw)^{0.50}$$

$$K_{IC} = 19 (Emi - (Qwi - Wwo))^{0.50} \quad (3-47)$$

Zona Las

$$K_{IC} = 19 (Emi - ((\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} Cp dT)))^{0.50} \quad (3-48)$$

Zona HTHAZ

$$K_{IC} = 19 (Emi - ((\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))^{0.50} \quad (3-49)$$

Zona LTHAZ

$$K_{IC} = 19 (Emi - ((\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))^{0.50} \quad (3-50)$$

Zona UBM

$$K_{IC} = 19 (Emi - ((\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}))^{0.50} \quad (3-51)$$

INSTA

$$K_{IC} = 12 \sqrt{CVN}$$

$$K_{IC} = 12 \sqrt{Emw}$$

$$K_{IC} = 12 \sqrt{Emi - (Qwi - Wwo)} \quad (3-52)$$

Zona Las

$$K_{IC} = 12 \sqrt{Emi - ((\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} Cp dT)))} \quad (3-53)$$

Zona HTHAZ

$$K_{IC} = 12 \sqrt{((\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))} \quad (3-54)$$

Zona LTHAZ

$$K_{IC} = 12 \sqrt{((\int_{r2}^{r3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))} \quad (3-55)$$

Zona UBM

$$K_{IC} = 12 \sqrt{((\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}))} \quad (3-56)$$

Prediksi ketangguhan retak K_{IC} pada Persamaan di atas adalah prediksi ideal yang merujuk pada neraca keseimbangan energi pada Gambar 3.7. Perlu dilakukan koreksi terhadap prediksi tersebut ketika neraca keseimbangan energi aktual telah diperoleh dari hasil pengujian impak pasca pengelasan pada setiap zona. Harga *Fracture resistance* J_{IC} pada setiap zona diperoleh dengan substitusi harga K_{IC} ke dalam persamaan (Broek, 1988) :

$$K_{IC} = \sqrt{EJ_R} \quad (3-58)$$

Akurasi prediksi *fracture resistance* J_{IC} ditentukan oleh kesesuaiannya dengan kurva J-R hasil pengujian *fracture resistance* di laboratorium sesuai standar ASTM E 1820.

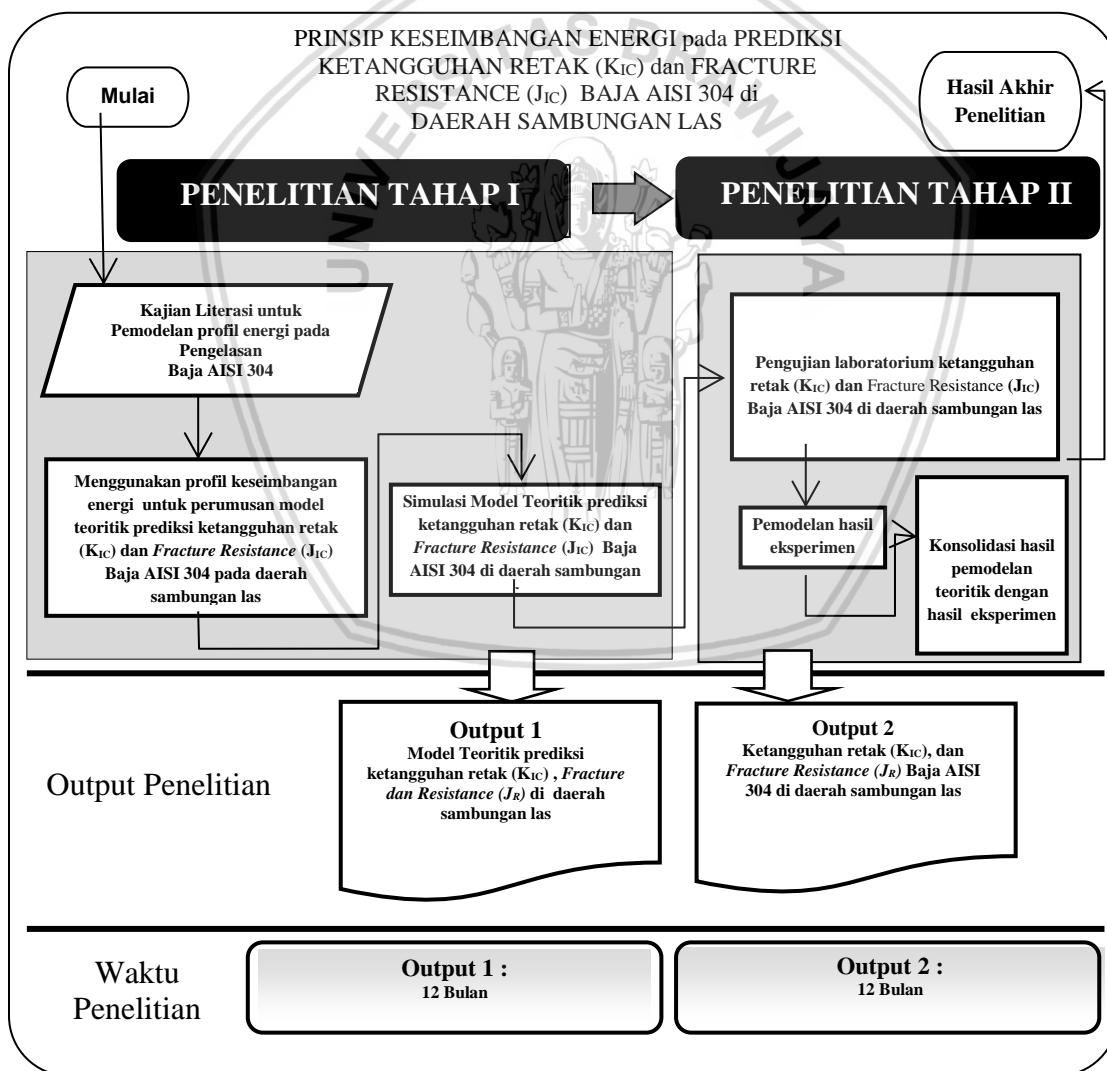
Dari paparan di atas, dapat di tarik hipotesis sebagai berikut :

1. Mengingat proses pengelasan dalam perspektif termodinamika adalah proses perpindahan energi maka neraca keseimbangan energi pengeleasan pada setiap zona akan dapat dirumuskan dengan mempertimbangkan energi pengelasan sebagai input energi serta peristiwa-peristiwa yang mengkonsumsi energi las pada setiap zona.
2. Sisa energi dalam material akan mempengaruhi ketersediaan energi retak yang pada akhirnya mempengaruhi ketangguhan retak kritis material (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) dengan:
 - formula telah dipaparkan di dalam persamaan 3-28 sampai dengan 3-56.
 - Prediksi nilai ketangguhan ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) menempatkan zona fusi memiliki nili ketangguhan retak tertinggi dan zona LTHAZ memiliki nili ketangguhan retak terendah , ketangguhan retak zona HTHAZ, zona UBM berada di antaranya.
 - Prediksi ketangguhan retak kritis kemungkinan akan sesuai dengan hasil pengujian laboratorium sesuai standar ASTM E 1820.
 - Karakter patahan ulet kemungkinan akan terjadi pada zona fusi dan zona HTHAZ dan patahan getas pada zona LTHAZ dan zona UBM.
 - Variasi ketangguhan retak (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) disebabkan oleh variasi input energi pengelasan dan dampaknya terhadap mikrostruktur, penguatan interstisi, penguatan presipitat dan tegangan sisa material.

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap yaitu: Tahap pemodelan teoritik dan tahap pembuktian induktif laboratorium seperti ditampilkan dalam skema tahap penelitian berikut :



Gambar 4.1. Skema Tahap Penelitian

4.1.1. Perumusan Model Teoritik

Tahap pertama penelitian dilakukan untuk mendapatkan model teoritik prinsip keseimbangan energi pada prediksi ketangguhan retak kritis (K_{IC}), dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada daerah sambungan las .

Perumusan model matematik dilakukan dengan analisis kebutuhan energi retak berdasar prinsip keseimbangan energi. Ketersediaan energi retak pada setiap zona dan subzona dipengaruhi oleh suplai energi pengelasan. Pada bagian pertama penelitian ini akan di petakan profil suplai energi dan konsumsi energi pada : *Fusion zone*, *High Temperature Heat Affected Zone*, *Low Temperature Heat Affected Zone* serta *Unaffected base metal zone*. Suplai energi pengelasan pada setiap zona dikonsumsi oleh peristiwa: remelting/solidifikasi, pertumbuhan butir (*grain growth*), rekristalisasi (*recrystallisation*), sensitisasi (*sensitisation*) dan pembangkitan tegangan sisa (*residual stress*) yang pada akhirnya akan mempengaruhi kebutuhan energi retak pada setiap zona dan subzona sebagai *driving force* (G) atau berpengaruh terhadap *crack resistance* (R).

Pada bagian kedua penelitian ini, profil suplai energi dan konsumsi energi yang telah diperoleh akan menjadi dasar pengembangan model matematik prediksi ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada daerah sambungan las.

4.1.2. Pembuktian Induktif

Pembuktian induktif dilakukan melalui pengujian laboratorium untuk mendapatkan neraca keseimbangan energi pengelasan, harga ketangguhan retak kritis (K_{IC}) dan *fracture resistance* kritis (J_{IC}).

a. Bahan

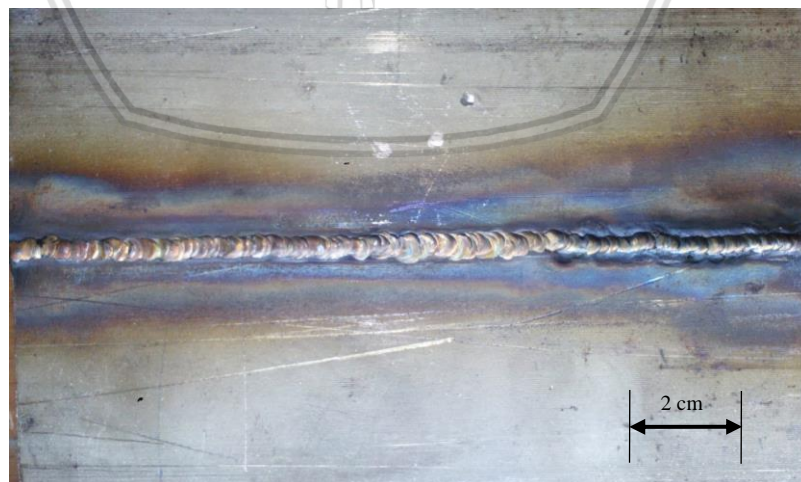
Pengujian induktif diawali dengan penyiapan specimen pengujian impak dan specimen pengujian *fracture resistance*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Stainless Steel* 304 berukuran 100 cm x 10 cm x 1 cm seperti ditampilkan pada Gambar 4.2. yang memiliki kandungan unsur sesuai Table 4.1. Material *Stainless Steel* AISI 304 berupa plat strip.

Gambar 4.2. *Stainless Steel*Tabel 4.1. Komposisi Kimia *Stainless Steel* 304 (% berat)

C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	Si	S	O	N
0.041	18.4	0.19	0.19	8.5	0.031	0.54	0.014	0.025	0.062

b. Pengelasan

Pengelasan dilakukan dua tahap. Tahap pertama digunakan untuk pembuatan specimen awal. Spesimen ini kemudian diuji mikrostruktur dan kekerasan mikro sebagai dasar penentuan batas daerah las, HTHAZ, LTHAZ (daerah sensitisasi) dan material induk (daerah tegangan sisa). Berikut hasil pengelasan material *Stainless Steel*:



Gambar 4.3. Pengelasan pada Spesimen Awal

Pengelasan tahap kedua dilakukan setelah diketahui batas daerah daerah las, HTHAZ, LTHAZ (daerah sensitisasi) dan material induk (daerah tegangan sisa). Posisi pengelasan menyesuaikan rencana pembuatan takik pada specimen uji impact. Pengelasan juga dilakukan pada penyiapan specimen pengujian fracture resistance. Berikut ditampilkan pengelasan pada penyiapan specimen impact dan pengelasan pada penyiapan specimen pengujian *fracture resistance* di daerah las, HTHAZ, LTHAZ dan material induk serta detail pengelasannya.



Gambar 4.4. Pengelasan pada Penyiapan Spesimen uji impact



Gambar 4.5. Pengelasan pada Penyiapan Spesimen Uji *Fracture Resistance*

Tabel 4.2. Detail Pengelasan

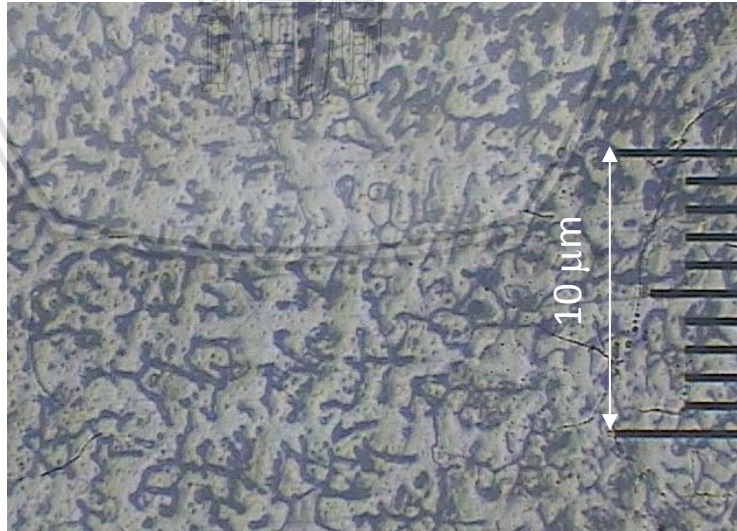
Welding process, Ampere, Voltage, Welding speed	141/GTAW, Welding run : Root (80 A-90 A, 17V-20V, 4 cm/min-5 cm/min); Hot (90 A-100 A, 20V-25V, 4 cm/min-5 cm/min); Fill (100 A-110 A, 20V-25V, 5 cm/min-7 cm/min); Cap (100 A-110 A, 20V-25V, 5 cm/min-7 cm/min)
Welding position	PA/1G-Down hand
Joint type	Butt Joint
Parents Material specification	AISI 304
Preparation cleaning	Mechanical
Welding sequence	1). Clean the surface (brush & grinding) 2). Dry 50° C, tack welding & welding 3). 1 Layer filled weld only in straight layer 4). Visual control of welding seam 5). Next layer in straight layer
Filler metal	ER 308 L, Post drying: dry store, Slow cooling, argon shielding gas
Other information	Preheat temp: plate dry > 25° C, welder's test: EN 287-1.PF

c. Pengamatan Mikrostruktur

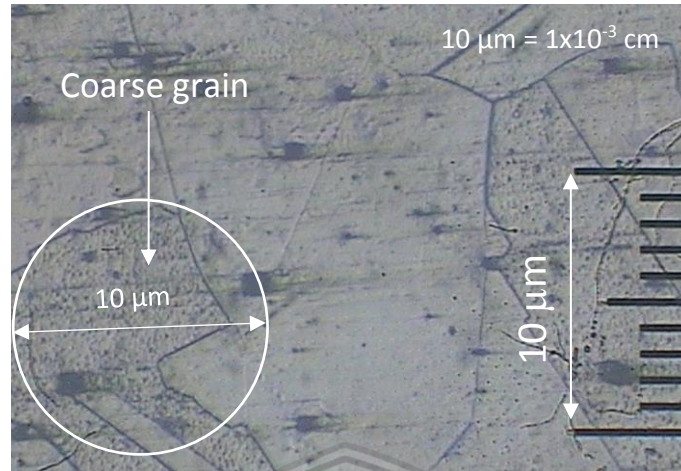
Pengamatan mikrostruktur dimaksudkan untuk menentukan batas daerah las, HTHAZ, LTHAZ dan material induk. Masing-masing daerah memiliki bentuk dan ukuran butir yang khas. Berikut specimen uji mikrostruktur dan hasil pengamatan mikrostruktur.



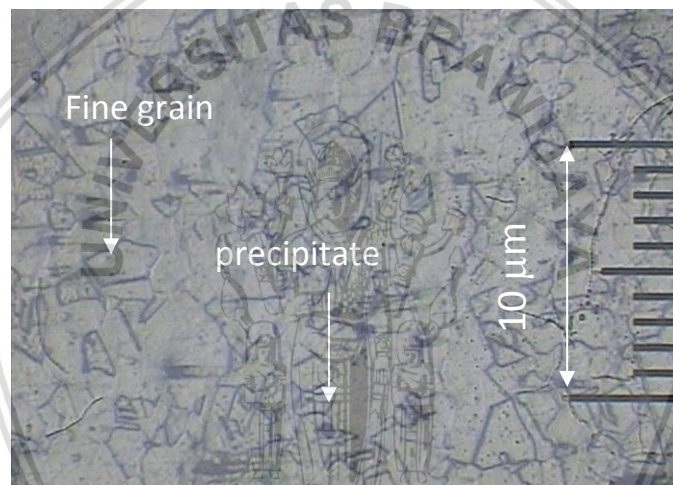
Gambar 4.6. Spesimen Uji Mikrostruktur



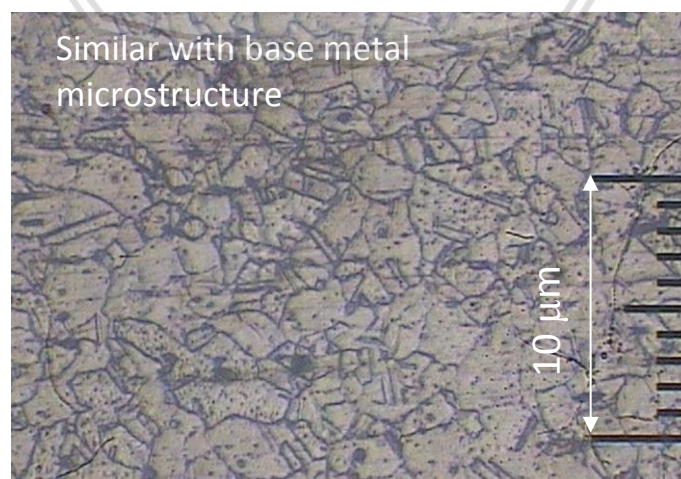
Gambar 4.7. Mikrostruktur Zona Las



Gambar 4.8. Mikrostruktur Zona HTHAZ



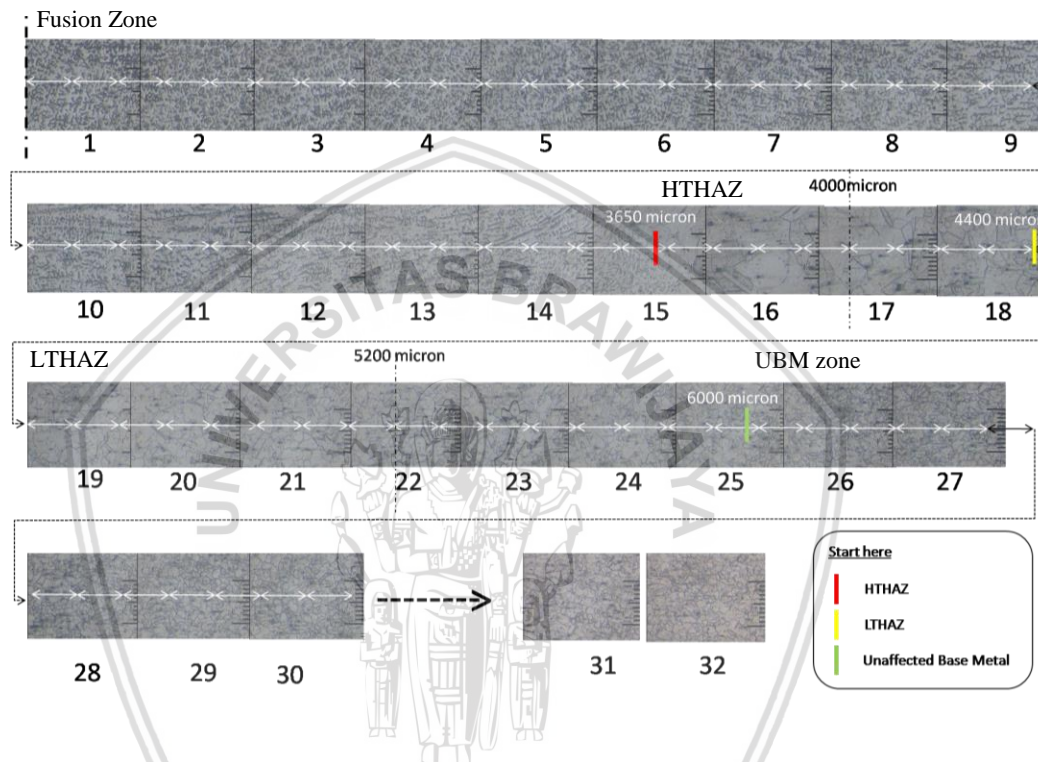
Gambar 4.9. Mikrostruktur Zona LTHAZ



Gambar 4.10. Mikrostruktur Zona *Unaffected Base Metal*

d. Identifikasi Daerah Sensitisasi

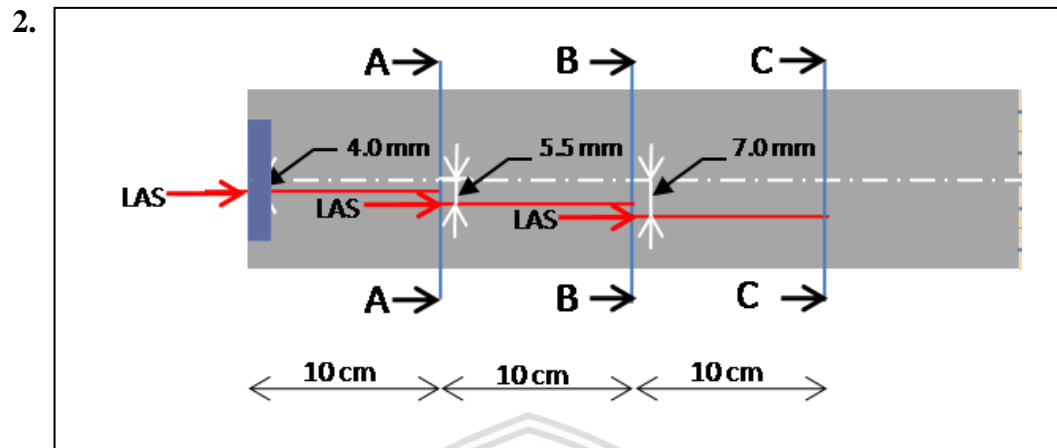
Sensitisasi terjadi pada daerah HAZ. Penentuan batas daerah dilakukan dengan cara menyusun citra hasil foto mikro secara berurut dari sumbu pengelasan ke sisi luar penampang material. Berikut ditampilkan penentuan batas keempat zona.



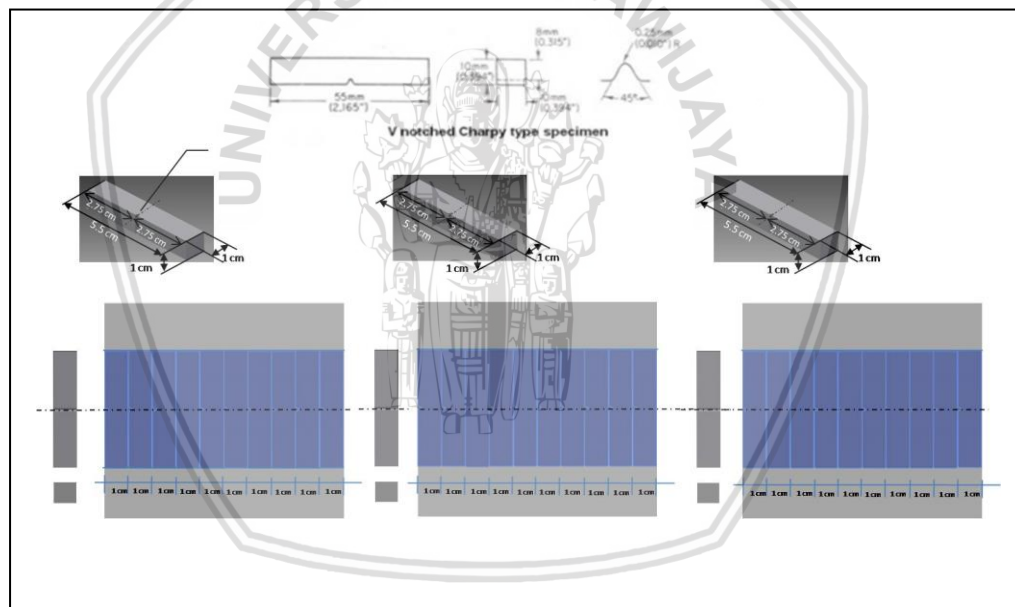
Gambar 4.11. Penentuan Batas Zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan Material Induk

e. Penyiapan Spesimen Impak

Memanfaatkan material yang telah disiapkan, sesuai dengan ASTM E23-02a specimen impak disiapkan menggunakan EDM untuk setiap zona dengan posisi pengelasan dan posisi potongan sebagai berikut:

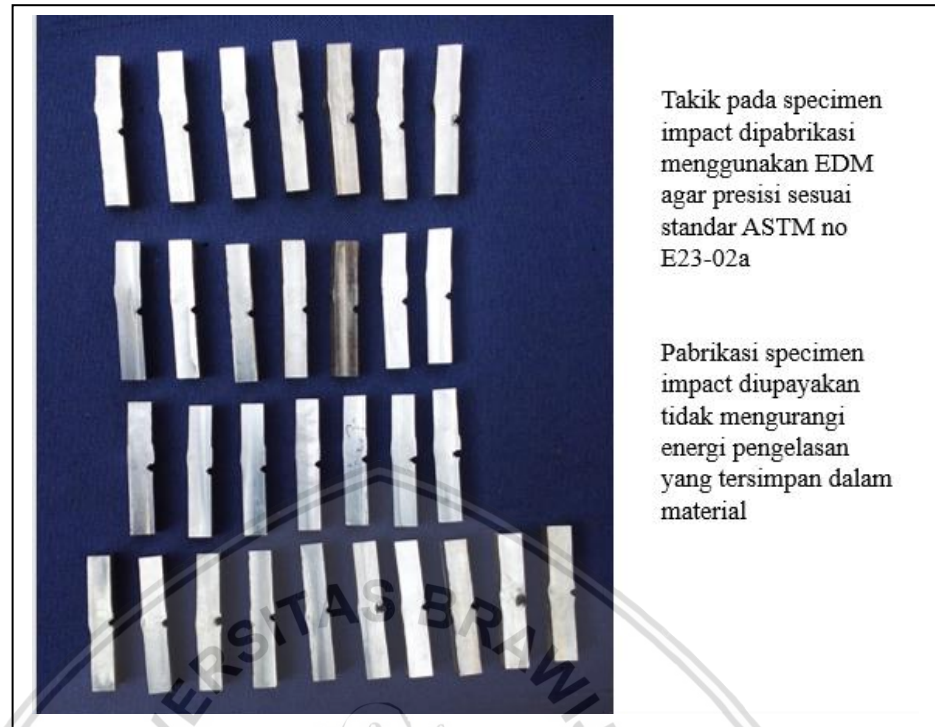


Gambar 4.12. Desain Posisi Las terhadap Sumbu Takik

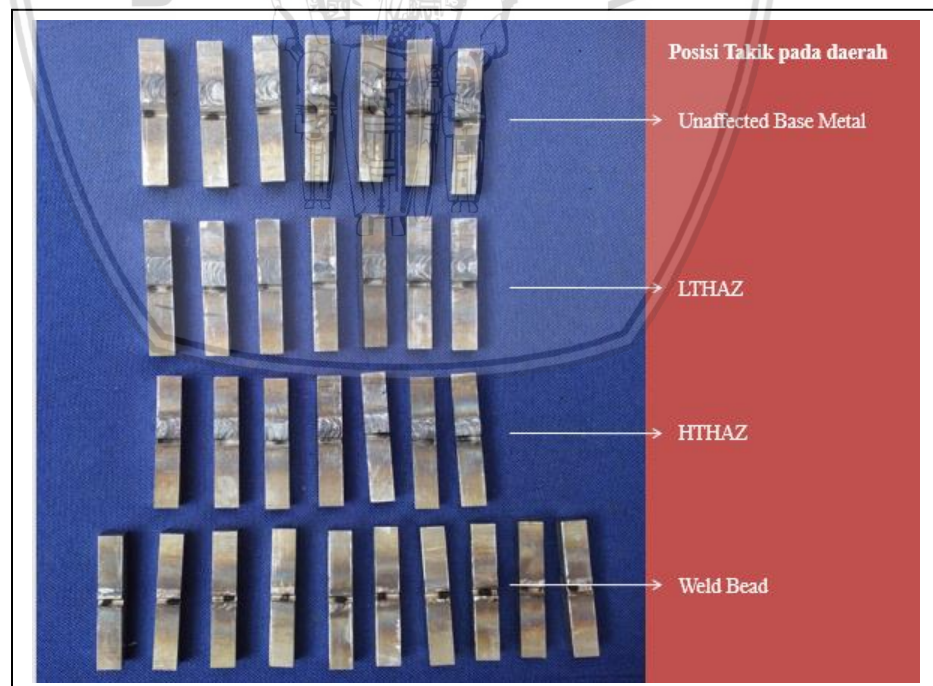


Gambar 4.13. Desain Posisi Potongan pada Penyiapan Spesimen Impak
Daerah HTHAZ, LTHAZ dan Material Induk

Pada Gambar 4.14. dan 4.15. ditampilkan specimen uji impact dan posisi takik pada specimen uji impact yang siap diuji.



Gambar 4.14. Spesimen Uji Impak Sesuai ASTM E23-02a



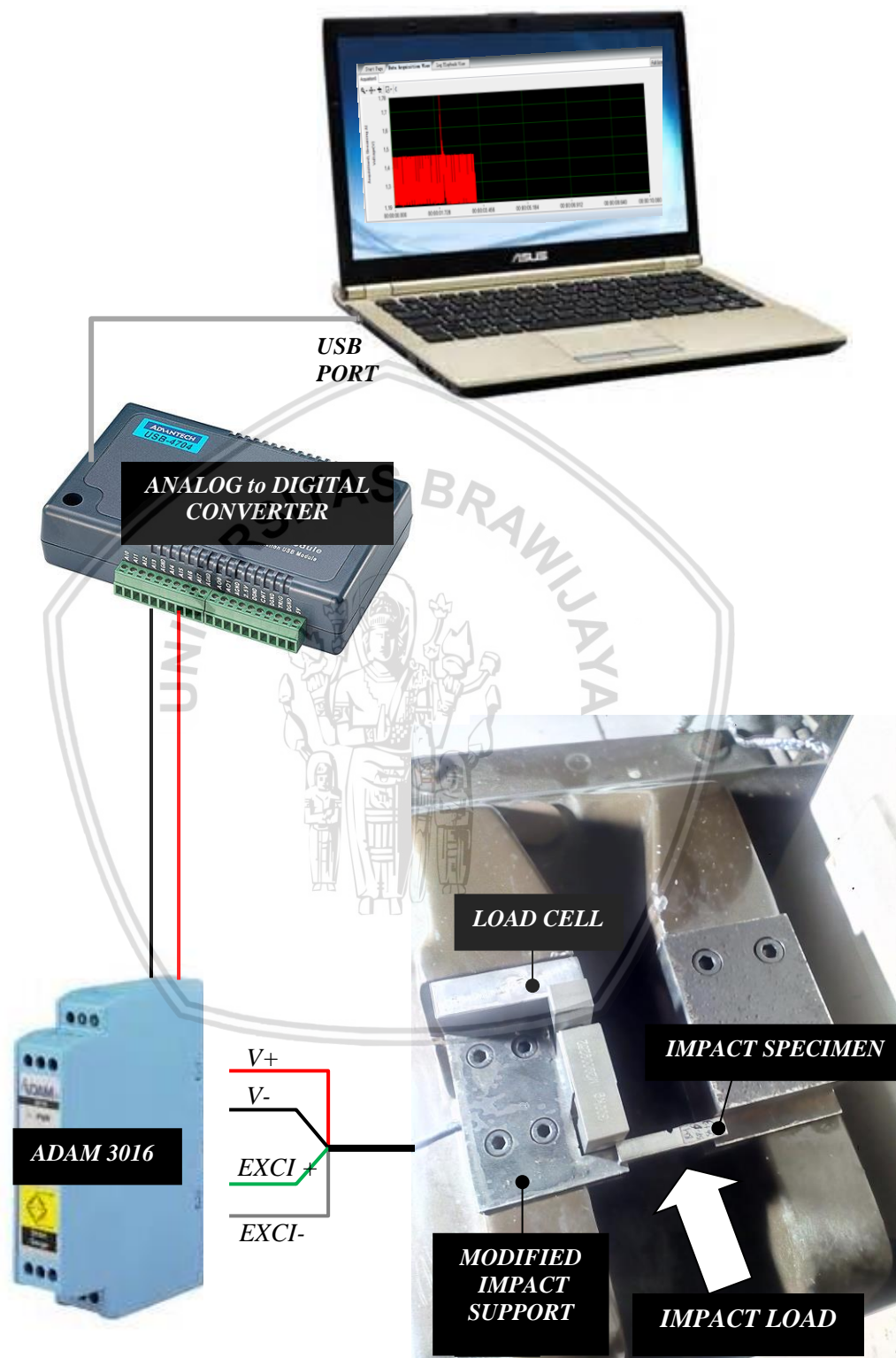
Gambar 4.15. Posisi Takik pada Specimen Uji Impak

f. Pengujian Impak Charpy

Neraca keseimbangan energi pengelasan diperoleh dari pengujian impak pada setiap zona dan subzona pengelasan. Untuk mendapatkan harga energi inisiasi retak dan energi propagasi retak perlu dilakukan modifikasi pada peralatan uji impak Charpy. Modifikasi berupa penambahan perangkat data akuisisi serta kamera kecepatan tinggi. Pengujian impak Charpy dilakukan dengan menggunakan mesin impak Charpy berkapasitas 300 Joules sesuai dengan standar pengujian ASTM E23-02a. Pengujian dilakukan terhadap spesimen AISI 304 dengan ukuran 55 mm x 10 mm x 10 mm pasca pengelasan. Mesin uji impak Charpy dan modifikasi perangkat data akuisisi berturut turut ditampilkan dalam Gambar 4.16.



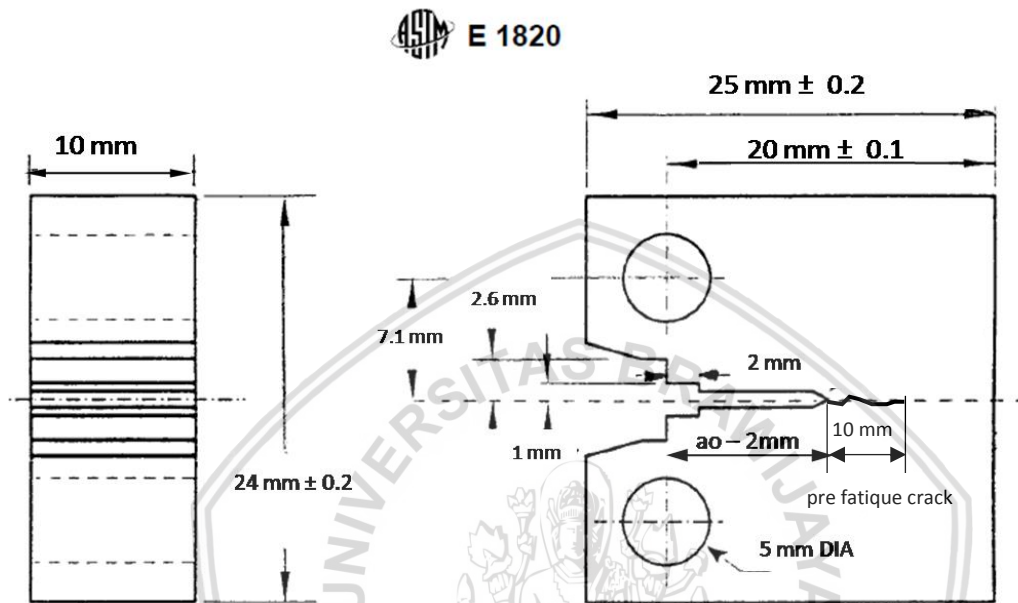
Gambar 4.16. Mesin Uji Impak dan Pemasangan *Load Cell*



Gambar 4.17. Perangkat Data Akuisisi

g. Penyiapan *Compact Tension Specimen* pada Pengujian *Fracture Resistance*.

Desain *Compact Tension Specimen* pada pengukuran J_{IC} sesuai ASTM E 1820 specimen A.2.1. ditampilkan pada gambar berikut:



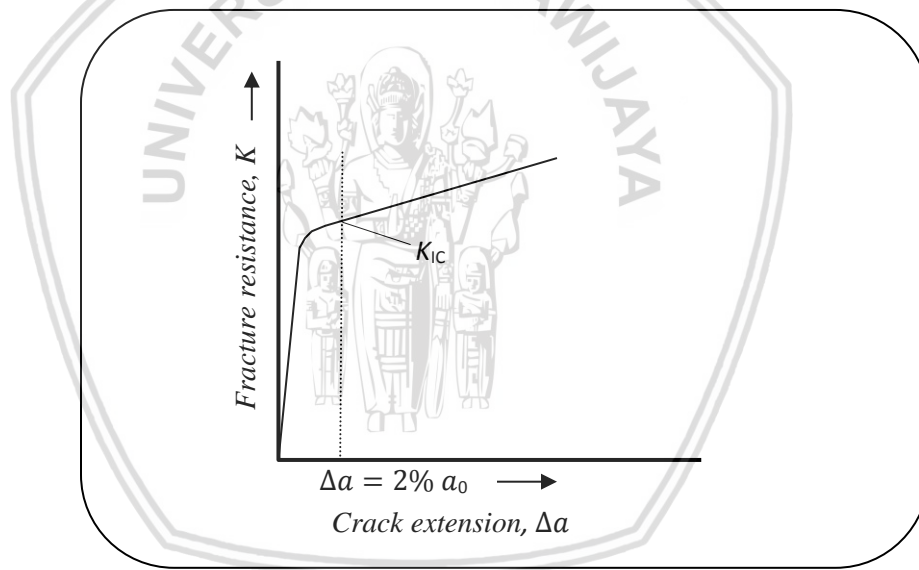
Gambar 4.18. Desain Spesimen Uji *Fracture Resistance* Sesuai ASTM E 1820
(Sumber : ASTM E 1820, 2008)



Gambar 4.19. Spesimen Uji *Fracture Resistance* Sesuai ASTM E 1820

h. Pengujian *Fracture Resistance*

Ketangguhan retak kritis (K_{IC}) (units : $\text{MPam}^{1/2}$) menjadi ukuran kemampuan material menerima tegangan sebelum terjadinya perambatan retak. Metode pengujian ketangguhan retak berawal dari konsep linear elastik. Metode linier-elastis pada pengujian ketangguhan retak digunakan untuk mengukur nilai ketangguhan retak pada satu titik. Pada pengujian material dengan mekanisme patah getas tidak ada persoalan untuk menentukan nilai ketangguhan retak pada satu titik. Penentuan nilai ketangguhan retak pada material dengan mekanisme patah ulet dilakukan dengan memilih satu titik pada R-curve seperti ditampilkan pada Gambar 4.20. Prosedur untuk menentukan satu titik ketangguhan retak pada R-curve telah dirumuskan pada standar pengujian ketangguhan retak kritis (K_{IC}) ASTM E 399.



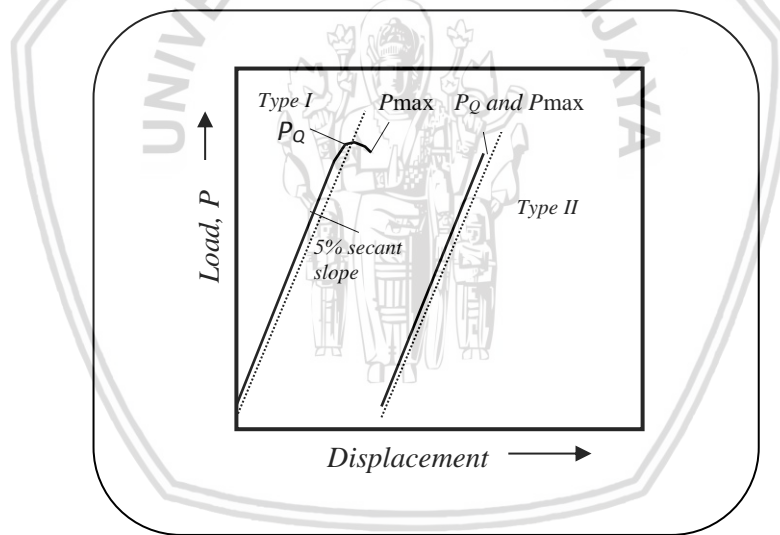
Gambar 4.20. *K-based Crack Resistance*

(Sumber: ASTM E 399, 1990)

Pengukuran ketangguhan retak dapat dilakukan dengan mengukur tegangan yang diperlukan untuk terjadinya propagasi retak pada specimen dengan retak awal. Menurut standar pengujian ASTM E 1820 yang merujuk pada standar pengujian ketangguhan retak kritis (K_{IC}) ASTM E 399, specimen yang digunakan pada pengukuran ketangguhan retak berupa *compact tension specimen* atau *threepoint bend specimen*.

Pengukuran ketangguhan retak pada *compact tension specimen* seperti dilakukan dengan terlebih dahulu memberikan beban siklik sehingga retak mulai merambat. Ketika panjang retak yang diharapkan telah tercapai beban siklik dihentikan (biasanya terjadi pada jumlah siklus 10^4 sampai dengan 10^6). Specimen kemudian ditarik sampai putus.

Hasil pengujian sesuai standar ASTM E 399 yang juga dirujuk oleh standar pengujian ketangguhan retak ASTM E 1820 berupa plot data pada grafik Load – Displacement ditampilkan pada Gambar 4.21. Data ini kemudian dianalisa untuk mendapatkan harga ketangguhan retak sementara K_Q . Harga K_Q terjadi saat pembebanan P_Q . Nilai pembebanan P_Q ditentukan dari perpotongan antara garis *original loading slope* dengan garis *secant slope* (kemiringan 5% kurang dari *original loading slope*). Kemiringan 5% kurang dari *original loading slope* pada grafik Load-Displacement setara dengan 2% *ductile crack extension* pada R-curve.



Gambar 4.21. *Load vs Displacement* Dengan Dua Tipe K_{IC}

(Sumber: ASTM E 399, 1990)

Nilai P_Q yang diperoleh dari grafik Load-Displacement digunakan untuk menentukan harga K_Q menggunakan persamaan berikut ini:

$$K_Q = \frac{P f(a/W)}{\sqrt{W}} \quad (4-1)$$

dengan

K_Q : Ketangguhan retak sementara

P : Beban

$f(a/W)$: fungsi kalibrasi

W : dimensi pada specimen ($W=2B$, B : tebal)

Pada pengujian menggunakan *Compact Tension Specimen* persamaan ketangguhan retak di atas menjadi:

$$K_Q = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 639 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (4-2)$$

Harga K_Q ini merupakan harga sementara ketangguhan retak. Bila memenuhi dua syarat berikut:

$$\frac{P_{maks}}{P_Q} \leq 1.10 \text{ dan} \quad (4-3)$$

$$a, B \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right), \quad (4-4)$$

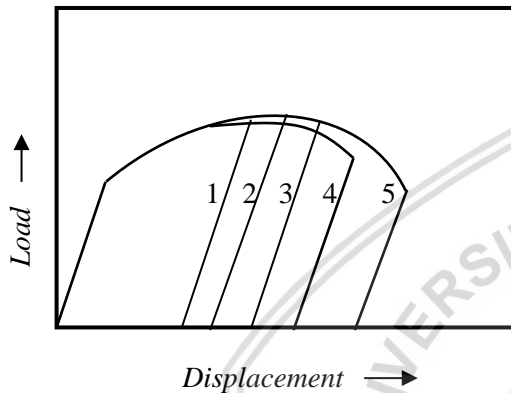
maka K_Q dapat ditetapkan sebagai harga ketangguhan retak K_{IC} .

Pada *three point bend specimen* pengukuran ketangguhan retak dilakukan dengan cara memberikan pembebanan bending pada specimen dengan retak awal. Seperti halnya pengukuran ketangguhan retak pada *compact tension specimen*, saat retak merambat besar tegangan direkam. Harga ketangguhan retak (K_{IC}) kemudian dihitung menggunakan persamaan:

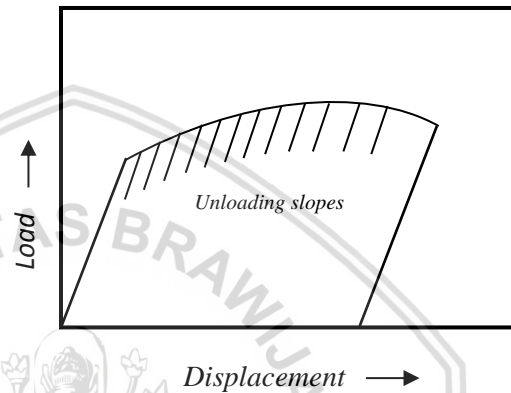
$$K_{IC} = \frac{4P}{B} \sqrt{\frac{\pi}{W}} \left[1.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 2.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 12.3 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 21.2 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 21.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (4-5)$$

Pada perpatahan elastis-plastis, pengukuran ketangguhan retak melibatkan dua parameter, yaitu: J dan δ . Pada sebagian besar pengukuran perpatahan *non-linear*,

mekanisme patahan yang terjadi adalah patah ulet sehingga penentuan ketangguhan retak perpatahan elastic plastis menggunakan *R-curve* melalui pengukuran: beban, *displacement* dan panjang retak. Standar pengujian yang penting pada penentuan ketangguhan retak menggunakan parameter *J* adalah J_{IC} . Pada pengujian J_{IC} yang merujuk pada ASTM 813, *R-curve* diperoleh dari grafik *J* versus Δa dengan metode *multiple specimen* atau *single specimen* seperti ditampilkan pada Gambar 33 dan Gambar 34.



Gambar 4.22. Load vs Displacement pada Pengujian Multiple Specimen (Sumber: ASTM E 813)



Gambar 4.23. Load vs Displacement pada Pengujian Unloading Slope (Sumber: ASTM E 813)

Dari grafik *Load – Displacement* diperoleh harga *J* yang merupakan kombinasi daerah elastis dan daerah plastis mengikuti persamaan:

$$J = J_{el} + J_{pl} \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\rho_{pl}}{Bb} \int_0^{V_{pl}} P dV_{pl} \quad (4-6)$$

dengan

K : faktor intensitas tegangan

E : modulus elastisitas bahan

ν : poisson's ratio

P : beban

V_{pl} : plastic displacement

B : tebal spesimen

b : specimen uncrack ligament ($W - a$), W = lebar spesimen

ρ_{pl} : $2 + 0,522 b/W$ (pada *CT specimen*)

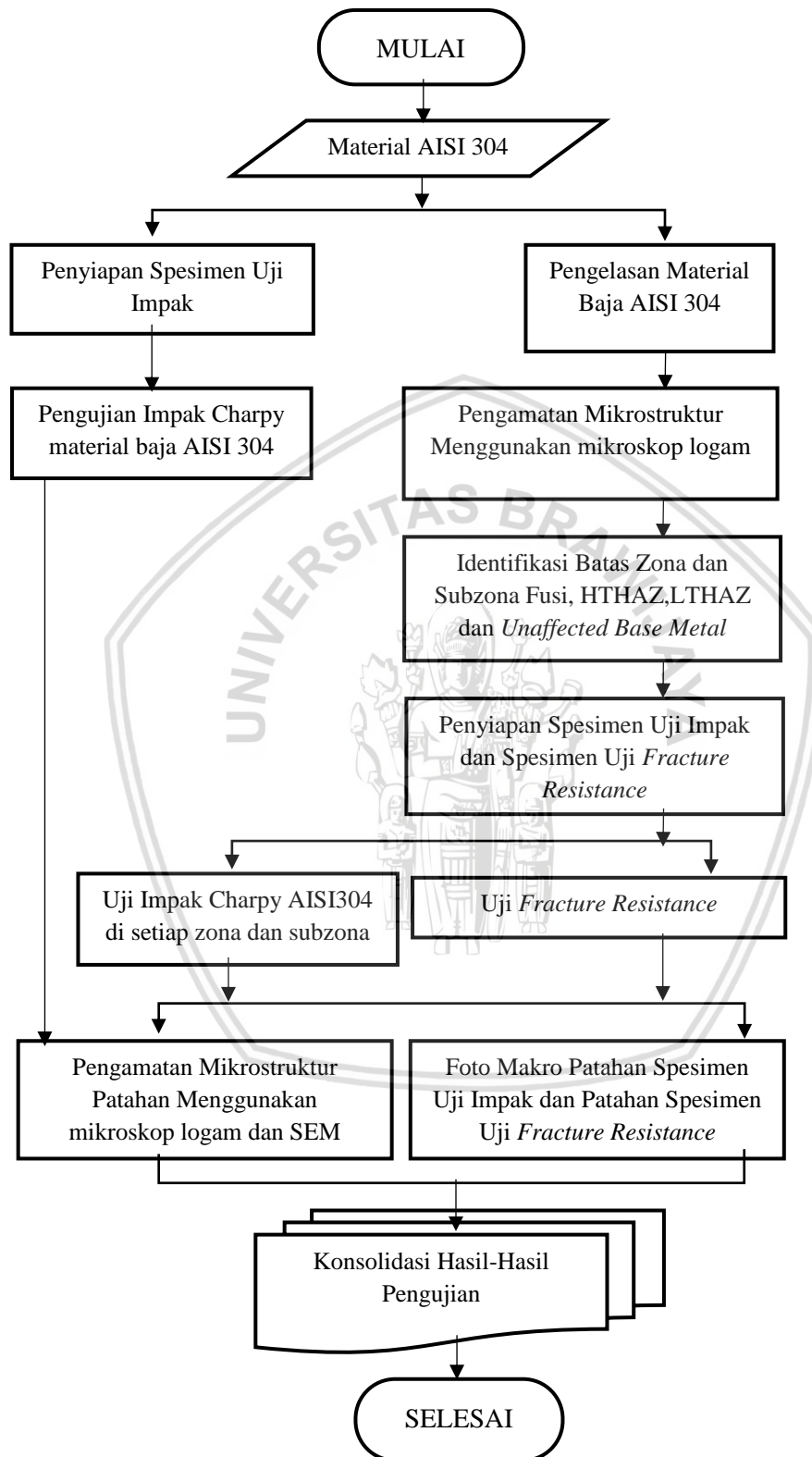
Pengujian *fracture resistance single specimen* dilakukan dengan menggunakan Mesin *Servopulsher* Schimadzu kapasitas 20 Ton. Seting beban 2 Ton dengan P_{max} 15 % dan P_{min} 1.5%. Dibuat retak awal a_0 pada empat buah *compact tension specimen*, sepanjang 10 mm. Setelah itu dilakukan proses *loading/unloading* dengan pertambahan beban 50 kg sampai putus. Pada Gambar 4.24 a sampai 4.24.d. ditampilkan mesin uji *servopulsher*, setting penempatan spesimen pada jig, *setting travelling microscope* dan setting pembebanan.



Gambar 4.24. Persiapan Pengujian *Fracture Resistance*

- a. Mesin *Servo Pulsher* Hidrolik
- b. Instalasi spesimen
- c. *setting* pembebanan
- d. *setting travelling microscope*

Selengkapnya alur pengujian induktif ditampilkan dalam diagram alir berikut ini :



Gambar 4.25. Diagram Alir Pengujian Induktif

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model neraca keseimbangan energi diuji dengan membandingkan hasil prediksi menggunakan rumus-rumus yang telah ditentukan pada setiap zona dengan data hasil percobaan di laboratorium menggunakan uji impak Charpy.

Beberapa parameter input diperoleh dari data sheet material sejenis serta referensi jurnal terdahulu. [2,7,8,18,19] sebagai berikut:

E_m	AISI 304	: 325 J
ΔH_{T1}		: 17.61 <i>kilo calories/mole weight</i>
T_1		: 1800 K
T_2		: 2023 K
Cp_{1800}^{2023}		: 10.5 <i>calories/mole weight</i>
ρ		: 8 g/cc
γ		: 1169 erg/cm ²
ΔG_v		: - 3000 J/cm ³
r		: 8 Å = 8 x 10 ⁻⁸ cm
E		: 200 GPa = 2 x 10 ¹¹ Pa
σ_{rmax}		: 215 MPa (<i>as high as yield strength</i>)

5.1. Penghitungan Energi Input Pengelasan

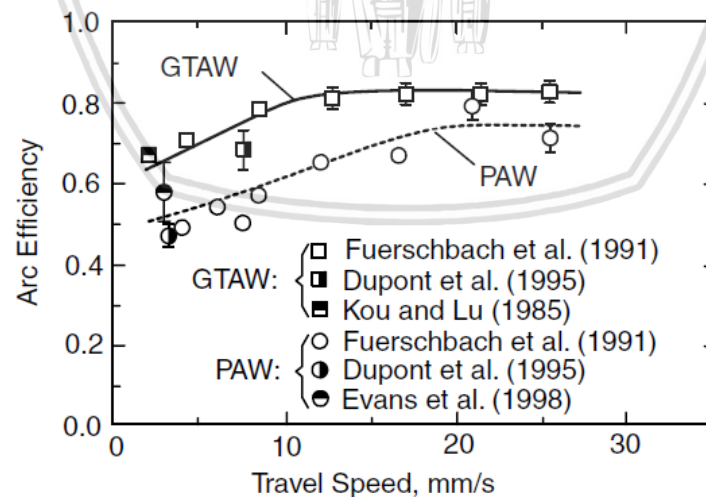
Energi pengelasan dihitung dengan Persamaan (3-1). Hasil penghitungan energi input pengelasan ditampilkan pada Tabel 5. 1.

Tabel 5.1. Energi Pengelasan

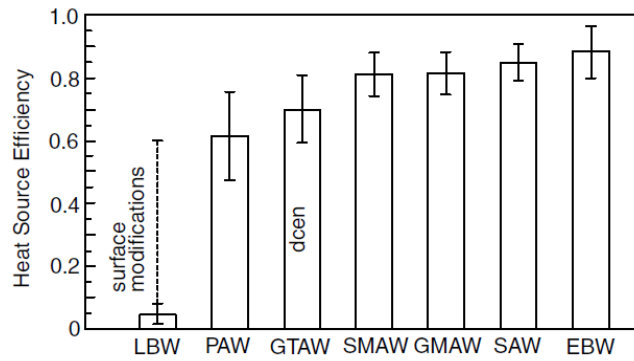
Welding run	Current <i>Ampere</i>	Voltage <i>Volt</i>	Travel speed <i>cm/min</i>	Current x Voltage <i>volt-ampere</i>	$Q = (\text{Current} \times \text{Voltage}) / \text{Travel Speed}$ <i>Joule/cm</i>
Root	80 - 90	17 - 20	4.0 – 5.0	1572.50	20966.67
Hot	90 - 100	20 - 25	4.0 – 5.0	2137.5	28500.00
Fill	100-110	20 - 25	5.0 – 7.0	2362.5	23625.00
Cap	100-110	20 - 25	5.0 – 7.0	2362.5	23625.00
Energi pengelasan total pada pengelasan sepanjang 1 cm (Joules) :					96716.67

5.2. Distribusi Energi Pengelasan

Menurut penelitian terdahulu (Fuerschbach et al., 1991, Dupont et al., 1995, Kou and Lou, 1985) pada pengelasan GTAW dengan kecepatan rendah hanya sekitar 60% sampai 70% energi yang diterima material seperti ditampilkan pada Gambar 5.1. dan Gambar 5.2.

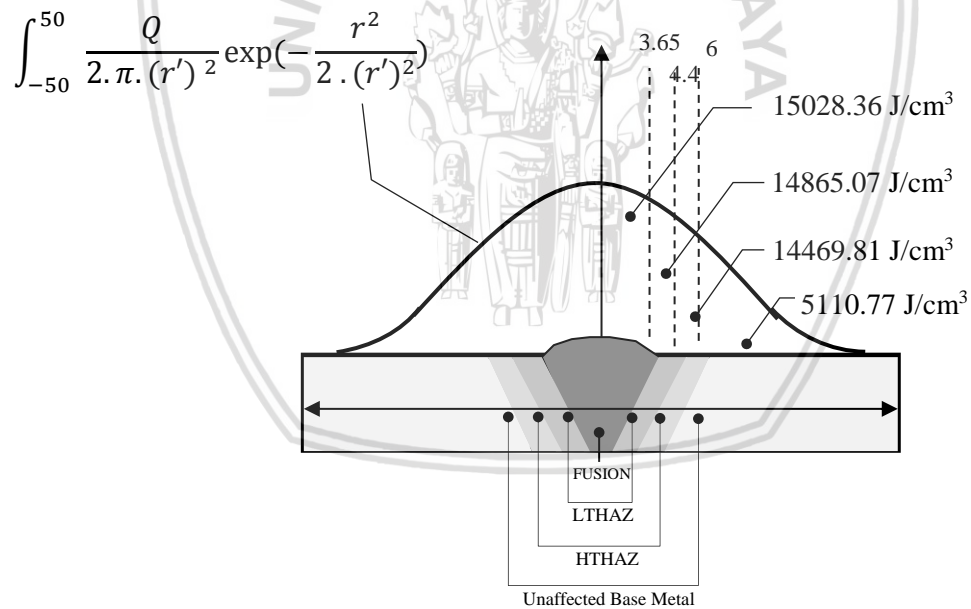


Gambar 5.1. Efisiensi Arc Welding dengan Variasi Kecepatan Pengelasan



Gambar 5.2. Efisiensi Berbagai Jenis Pengelasan

Merujuk pada Tabel 5.1. energi pengelasan terdistribusi mengikuti pola Distribusi Gaussian seperti ditampilkan pada Gambar 5.3.



Gambar .5.3. Hasil Perhitungan Distribusi Energi Pengelasan

5.3. Penghitungan Konsumsi Energi pada Setiap Zona

a. Zona Fusi

Menggunakan Persamaan (3-3) serta mempertimbangkan harga ΔH_{T1} , T_1 , T_2 , Cp_{1800}^{2023} , energi yang dibutuhkan untuk peleburan kembali (*remelting*) 1 gram logam pada zona fusi dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E_m &= 17.61 + \int_{1800}^{2023} 0.0105 dT \\ &= 19.95 \text{ kcal / mol wt.} \end{aligned}$$

bila berat per mol Fe = 55.85 g maka ,

$$E_m = 1495.3 \text{ Joules / gram.}$$

energy peleburan kembali yang dibutuhkan pada 0.73 cm^3 volume zona fusi sebesar :

$$\begin{aligned} E_{mv} &= 1495.3 \text{ J/g} \times 8 \text{ g/cm}^3 \times 0.73 \text{ cm}^3 \\ &= 8732.552 \text{ Joules} \\ &= 5312.30 \text{ Joules/ volume zona Fusi} \\ &= 11962.4 \text{ Joules/cm}^3 \end{aligned}$$

b. Zona HTHAZ

Pada HTHAZ , merujuk persamaan (3-4) sampai dengan Persamaan (3-7) dan besar energi input sesuai Gambar 5.3. jumlah energi yang dikonsumsi oleh peristiwa pertumbuhan butir, sensitisasi dan pembangkitan tegangan sisa secara berurutan adalah:

$$E_{\text{grain growth}}$$

$$= \frac{3\gamma}{D}$$

$$= \frac{3 \times 1169 \text{ erg/cm}^2}{1 \times 10^{-3} \text{ cm}} \text{ (Diameter butir D lihat gambar 4.8)}$$

$$= 0.052 \text{ Joules / volume zona HTHAZ}$$

$$= 0.3507 \text{ Joules / cm}^3$$

$$E_{\text{Sensitization}}$$

$$= 10.98 \text{ kJ/mol} \times (\text{bj} \times \text{vol} / 55.85 \text{ gram})$$

$$= 235.9 \text{ joules / volume zona HTHAZ}$$

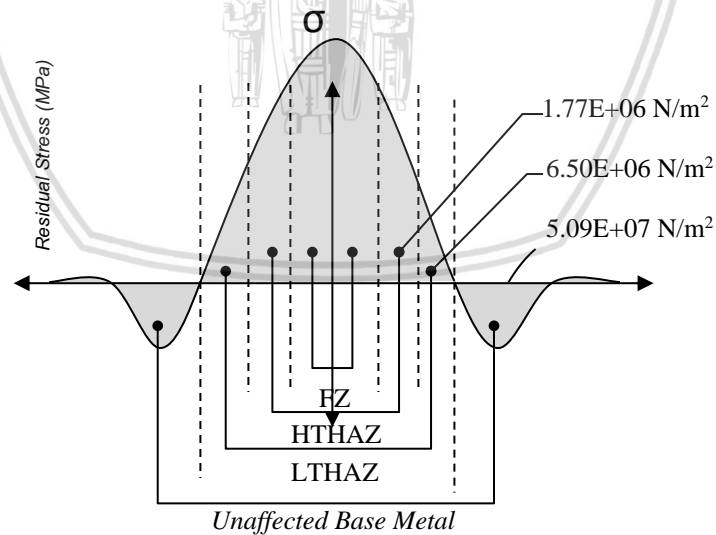
$$= 1572.78 \text{ joules / cm}^3$$

$$U_{\text{residual stress}}$$

$$= \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}$$

$$= \frac{(1.77\text{E}+06 \text{ N/m}^2)^2}{2 \cdot (200 \text{ GPa})}$$

$$= 15.707 \text{ joules / vol HTHAZ}$$



Gambar 5.4. Residual Stress Distribution

c. Zona LTHAZ

Disamping proses rekristalisasi pada zona LTHAZ, sensitisasi dan pembangkitan tegangan sisa juga mengkonsumsi energi pengelasan. Merujuk persamaan (3-5), (3-7) dan Gambar 5.4. konsumsi energi pada zona LTHAZ adalah sebagai berikut:

$$E_{\text{recrystallisation}}$$

$$\begin{aligned}\Delta G &= \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \gamma \\ &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (8 \times 10^{-8})^3 \cdot 1 \times 10^{10} + 4 \cdot \pi \cdot (8 \times 10^{-8})^2 \cdot 1.169 \times 10^{-4} \\ &= 0.0214 \text{ joules} \\ &= 0.0068 \text{ joules/volume LTHAZ}\end{aligned}$$

$$E_{\text{Sensitization}}$$

$$\begin{aligned}&= 10.98 \text{ kJ/mol} \cdot (\text{bj} \cdot \text{vol} / 55.85 \text{ gram}) \\ &= 503.29 \text{ joules / volume LTHAZ} \\ &= 3355.27 \text{ joules / cm}^3\end{aligned}$$

$$U_{\text{residual stress}}$$

$$\begin{aligned}&= \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \\ &= \frac{(6.50 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2}{2 \cdot (200 \text{ GPa})} \\ &= 211.523 \text{ joules / vol LTHAZ} \\ &= 661.01 \text{ joules / cm}^3\end{aligned}$$

d. Zona UBM

Pada zona *unaffected base metal* hanya proses pembangkitan tegangan sisa yang mengkonsumsi energi pengelasan. Jumlah energi yang dikonsumsi pada zona ini adalah:

$$U_{\text{residual stress}}$$

$$\begin{aligned}&= \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \\ &= \frac{(5.09 \times 10^7 \text{ N/m}^2)^2}{2 \cdot (200 \text{ GPa})} \\ &= 12977.5 \text{ joules/vol UBM} \\ &= 1474.71 \text{ joules/cm}^3\end{aligned}$$

Rangkuman hasil penghitungan supply energi dan konsumsi energi pada setiap zona ditampilkan dalam Tabel 5.2.

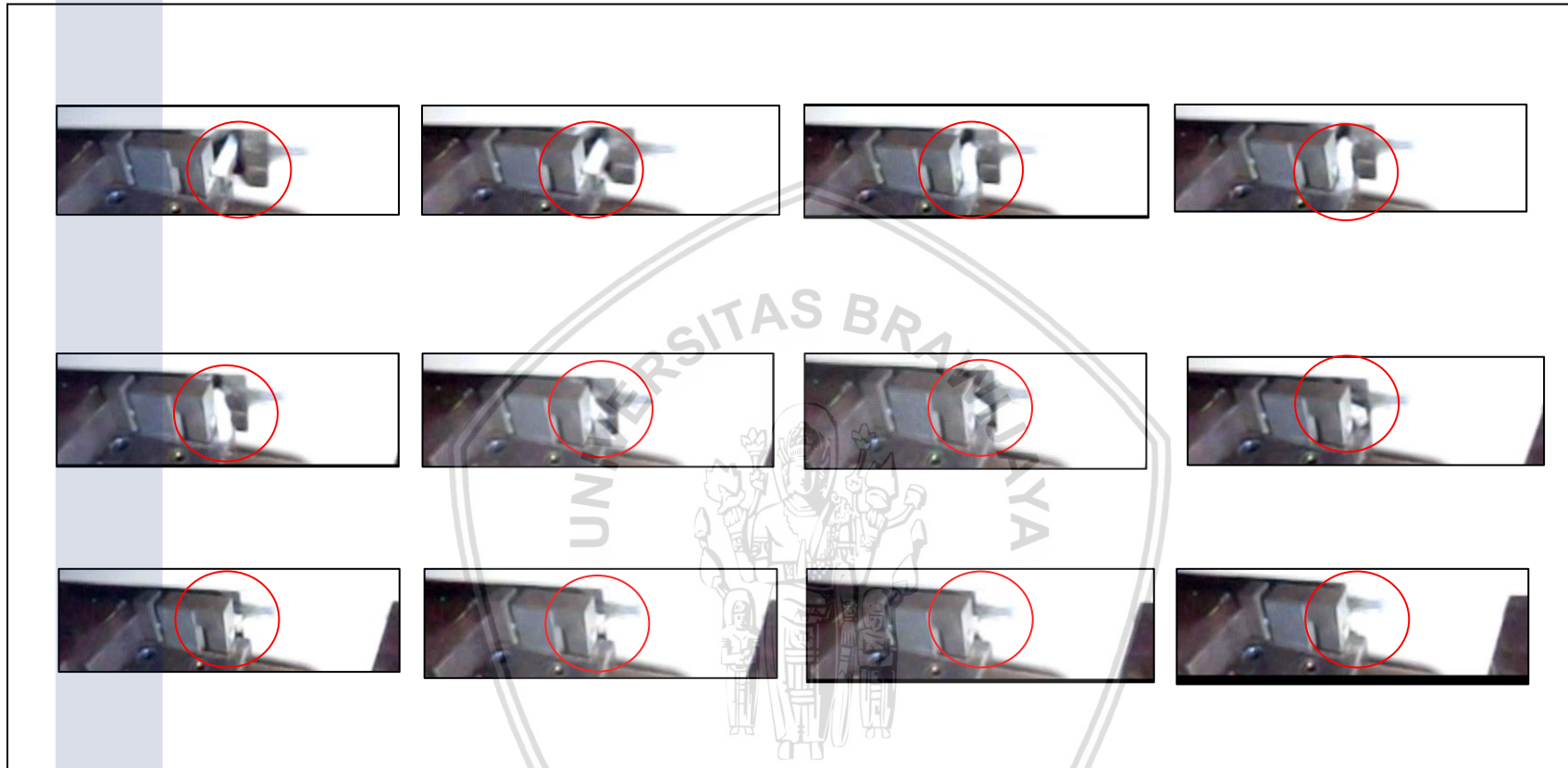
Table 5.2. Energi Input Pengelasan dan Konsumsi Energi pada Pengelasan AISI 304

<i>Zone</i>	<i>Qwi</i> (J/cc)	<i>Qwi</i> (Joules /vol zona)	<i>Wwo</i> (J/cc)		<i>Wwo</i> (Joules /vol zona)
<i>Fusion Zone</i>	15028.36	5485.35	11962.4		5312.3
<i>HTHAZ</i>	14865.07	1114.88	GG	0.3507	0.052
			S	1572.78	235.9
			RS	104.7	15.707
<i>LTHAZ</i>	14469.81	2315.17	Rc	0.0214	0.0068
			S	3355.27	503.291
			RS	661.01	211.523
<i>Unaffected Base Metal</i>	5110.77	22487.4	1474.71		12977.5

5.4. Pengujian Neraca Keseimbangan Energi

5.4.1. Hasil pengujian Impak Charpy

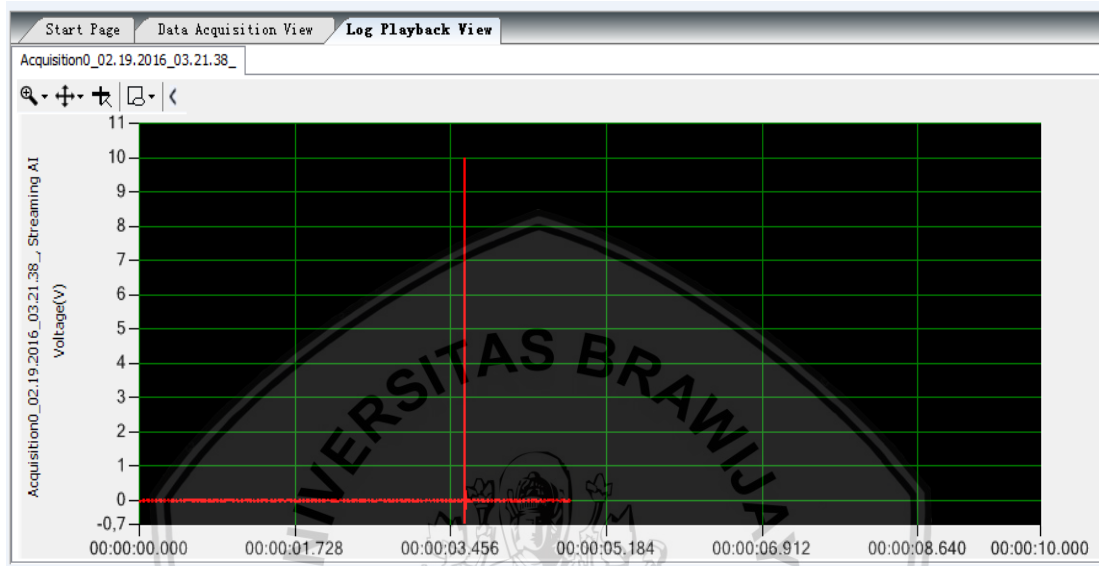
Hasil pengujian Impak Charpy yang dilengkapi data akuisisi dan kamera kecepatan tinggi meliputi: total serapan energi, *image capture* saat benturan dan grafik pembebanan saat benturan ditampilkan pada Gambar 5.5. sampai Gambar 5.24. dan Tabel 5.3. Grafik pembebanan yang telah dikonversi menjadi grafik penyerapan energi ditampilkan pada Gambar 5.28 sampai dengan Gambar 5.31.



Gambar. 5.5. *Image capture* Saat Benturan pada Pengujian Impak

Image capture saat benturan pada pengujian impak pada awalnya diharapkan menjadi sumber informasi pelengkap pada analisis energy saat pembentukan retak, namun kecepatan, resolusi kamera dan penempatannya pada mesin uji impak kurang memadai untuk memberikan hasil yang diharapkan.

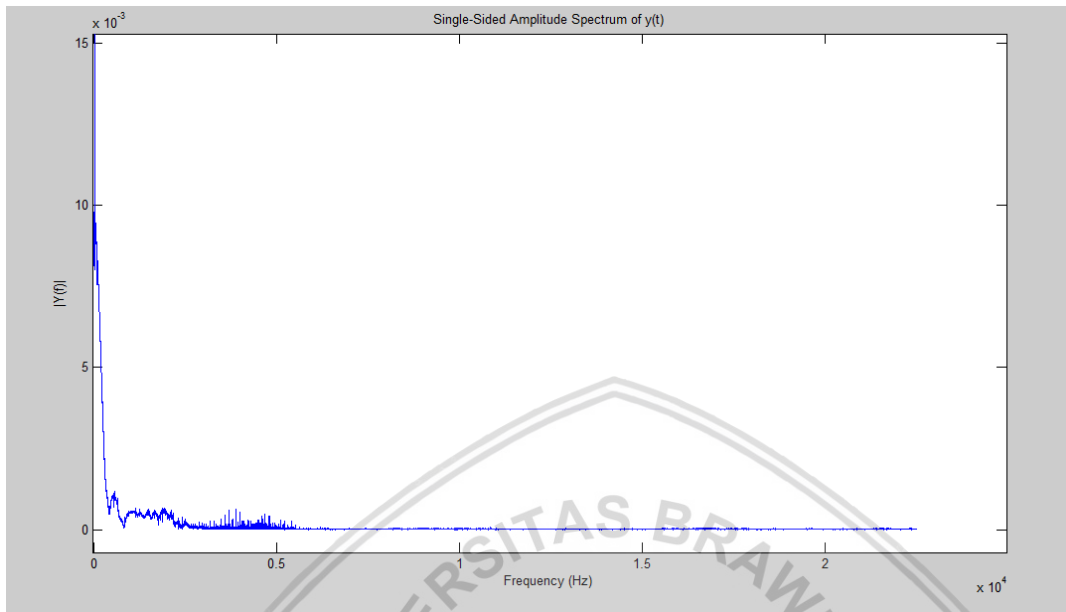
Capture video proses penyerapan energi saat benturan pada pengujian impact di semua zona menunjukkan tegangan pada perangkat data akuisisi saat load cell menerima beban berkisar 8 volt sampai dengan 10 volt.



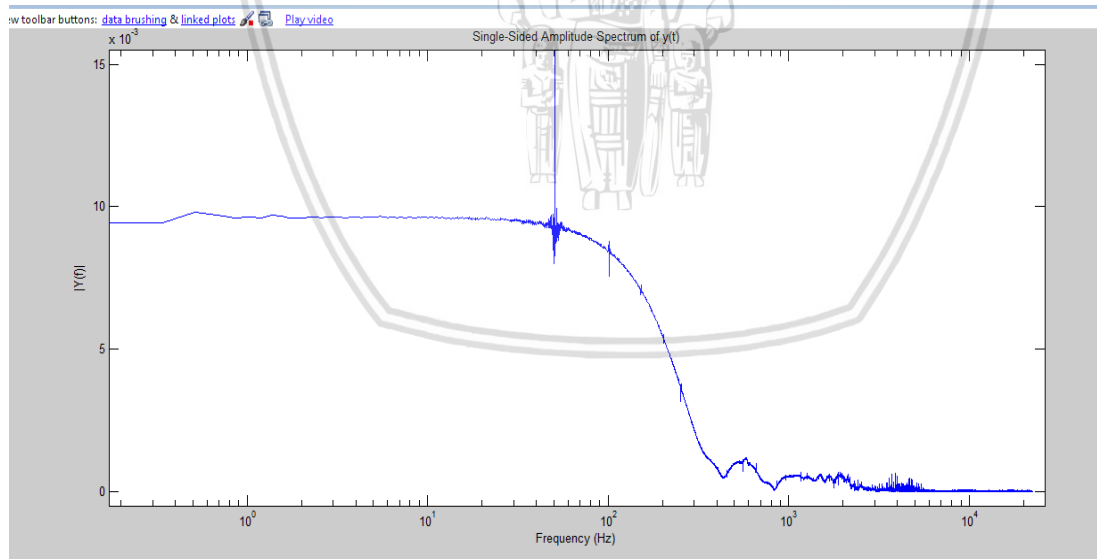
Gambar 5.6. Grafik Proses Penyerapan Energi Saat Benturan pada Zona Las

Perangkat lunak *Mathlab* dimanfaatkan untuk menampilkan Instrumen matematik *Fast Fourier Transform* dan *inversnya* guna memastikan sinyal yang diharapkan saat benturan terpisah dari sinyal *noise*. Pada Gambar 5.7. Grafik *Fast Fourier Transform* sinyal saat benturan terlihat berada pada frekuensi rendah. Lebih jelas dalam skala logaritmik sinyal saat benturan terjadi pada frekuensi sekitar 10 sampai dengan 100 *herzt* sementara sinyal *noise* terjadi pada frekuensi tinggi antara 1000 sampai dengan 10000 hertz.

Data Waktu (t) – Tegangan (Volt) pada frekuensi rendah tersebut dipisahkan kemudian dikonversi menjadi *Displacement (v)* - Beban (P) –dengan skala kalibrasi 1 volt = 76.92308 kg . Hasil konversi tersebut selanjutnya diplot dalam grafik *Displacement (v)* – Beban (P) sperti ditampilkan pada Gambar 5.9., 5.14., 5.19. dan 5.24.

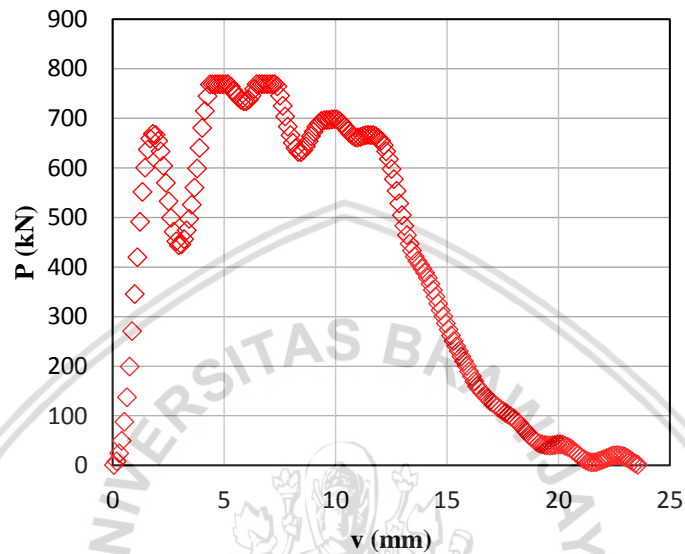


Gambar 5.7. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona Las



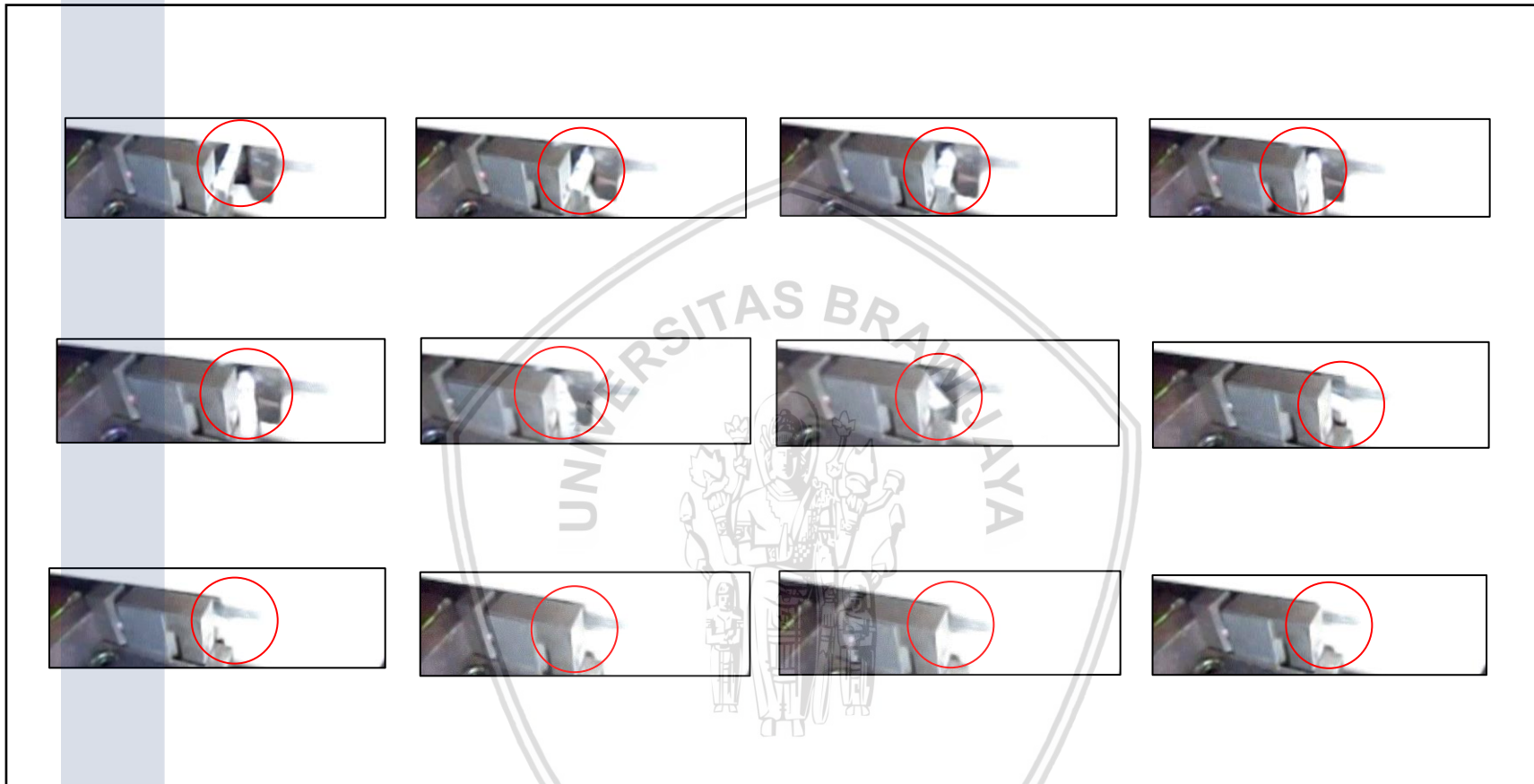
Gambar 5.8. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona Las dalam Skala Logaritmik

FUSION ZONE IMPACT TEST
LOAD (P) vs DISPLACEMENT (v)

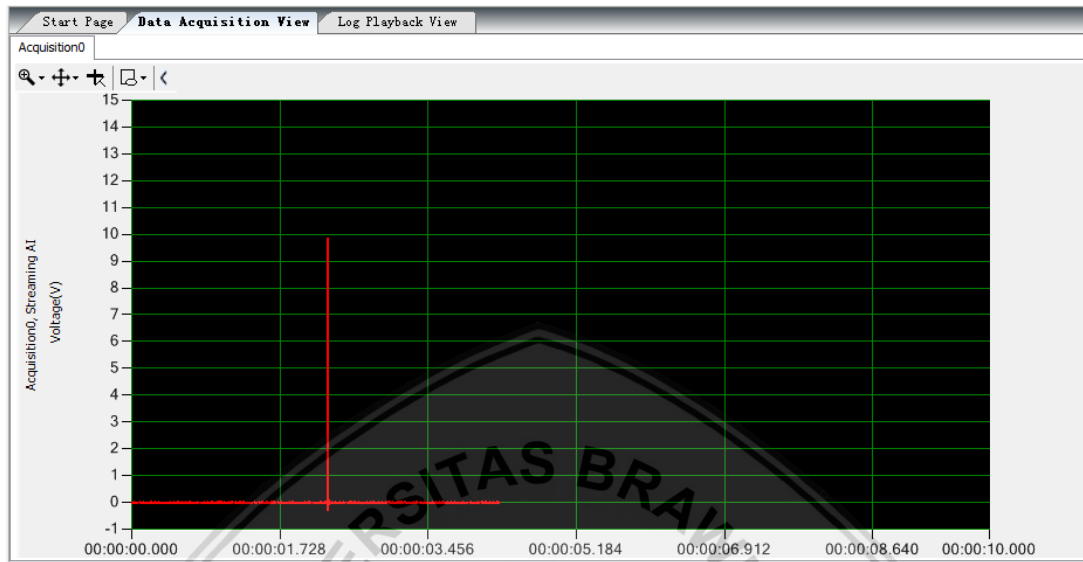


Gambar 5.9. Profil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona Las
Skala Kalibrasi 1 volt = 76.92308 kg

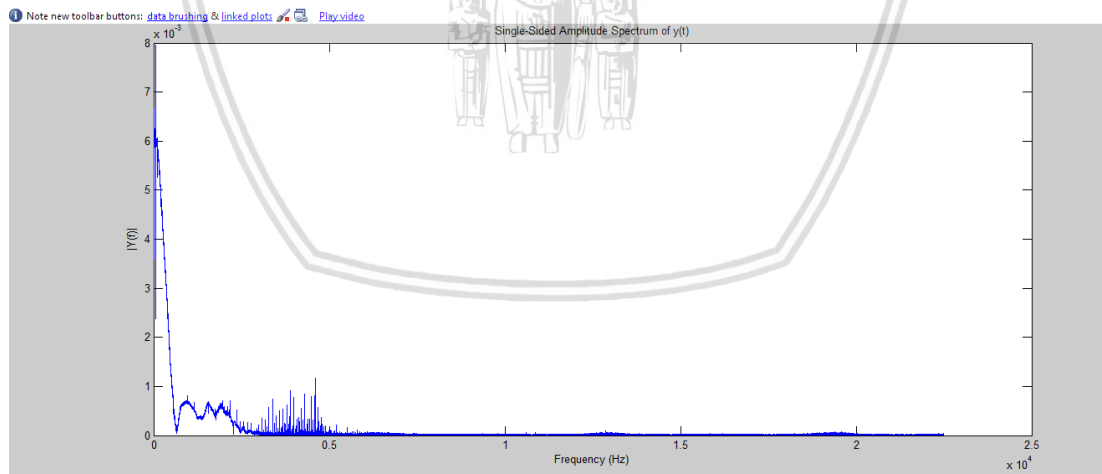
Benturan terjadi dalam waktu yang sangat pendek sekitar 5/45000 detik . Pada rentang waktu tersebut pada semua zona diperoleh lebih dari 100 data. Pada zona Fusi saat benturan terdapat 202 data. Beban maksimum terjadi pada 769,1369 kN.



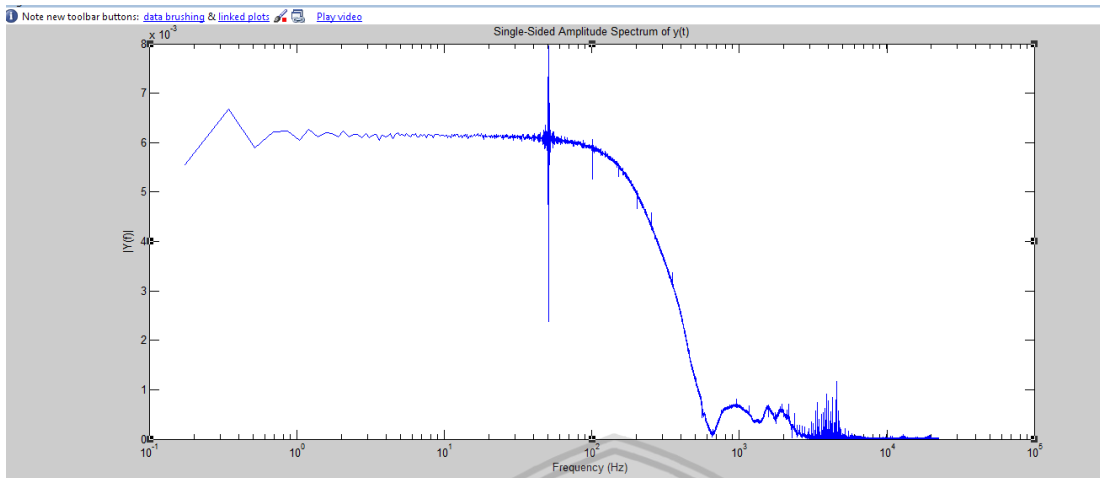
Gambar 5.10. *Capture image* Saat Benturan pada Pengujian Impak Charpy Zona HTHAZ



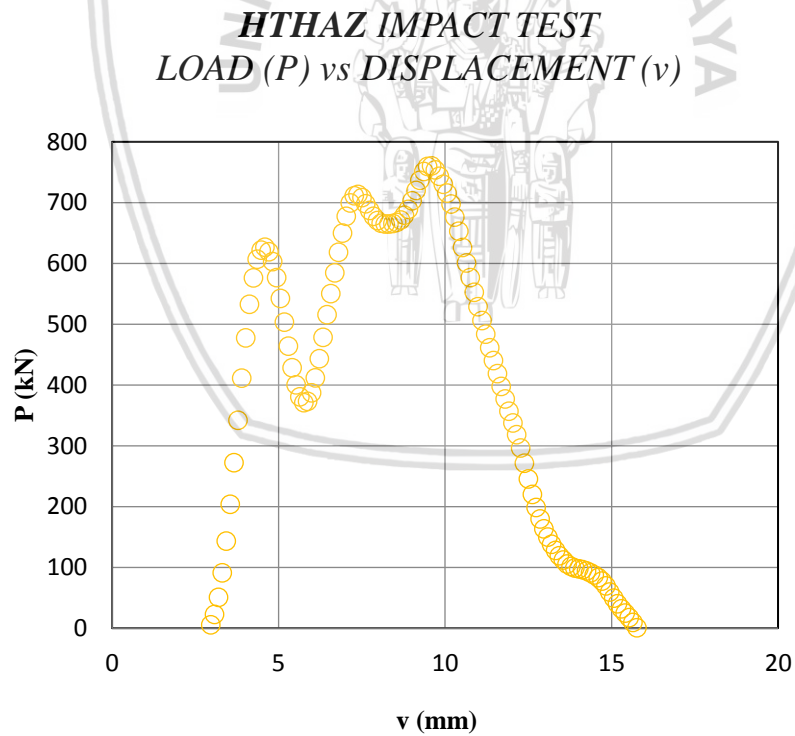
Gambar 5.11. Grafik Proses Penyerapan Energi Saat Benturan pada Zona HTHAZ



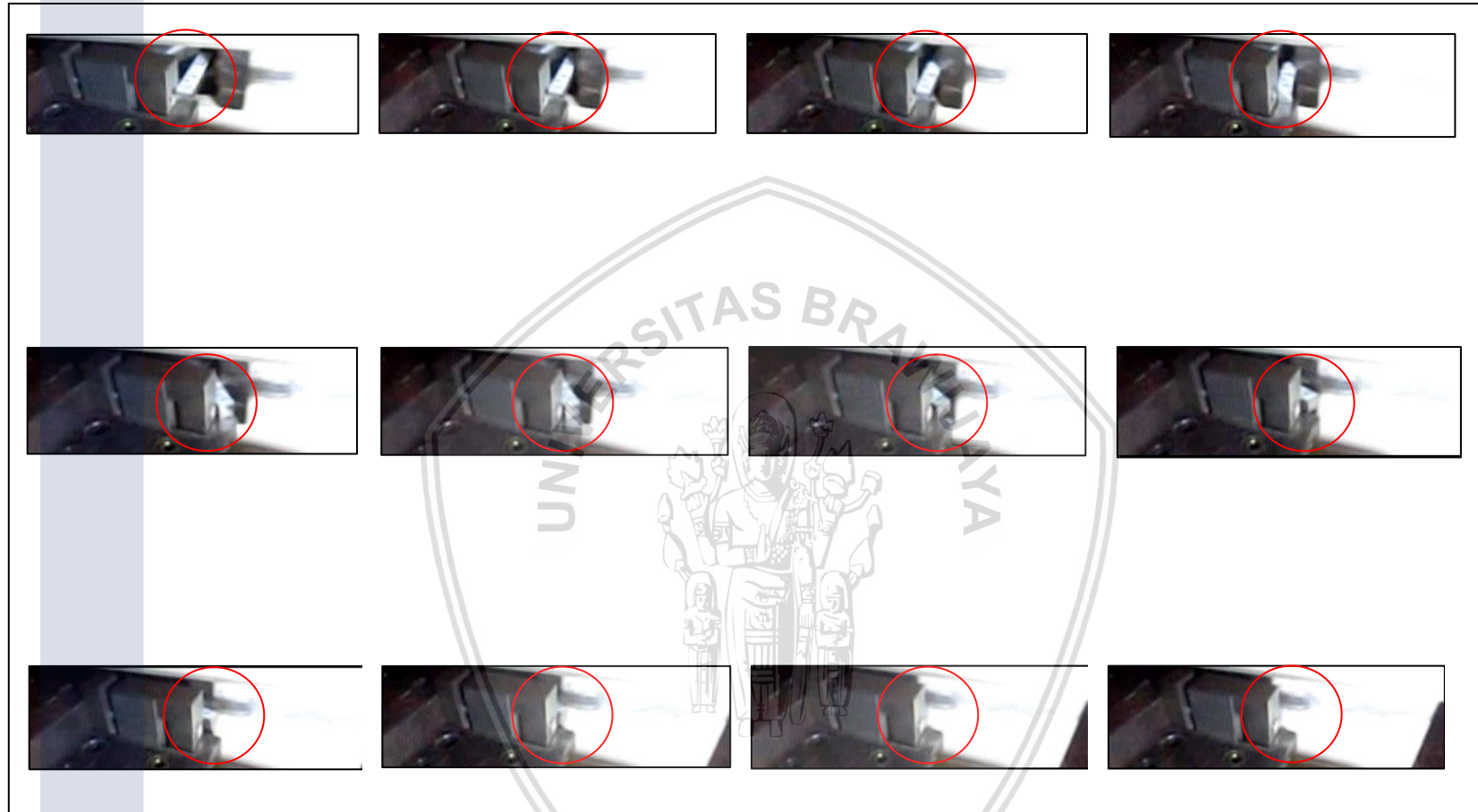
Gambar 5.12. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona HTHAZ



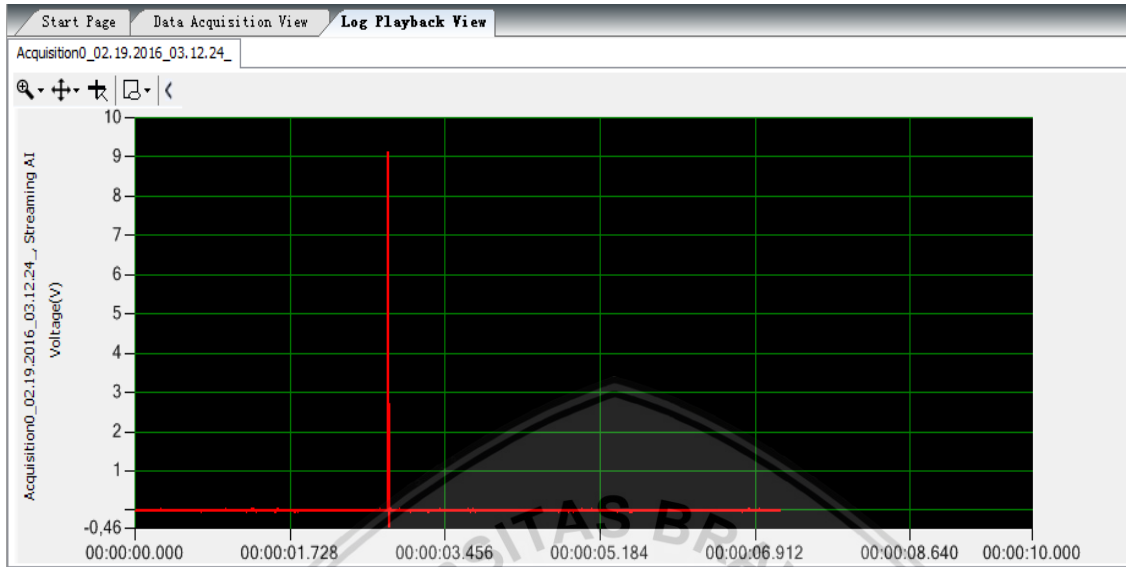
Gambar 5.13. *Fast Fourier Transform* pada data pengujian impak zona HTHAZ dalam skala Logaritmik



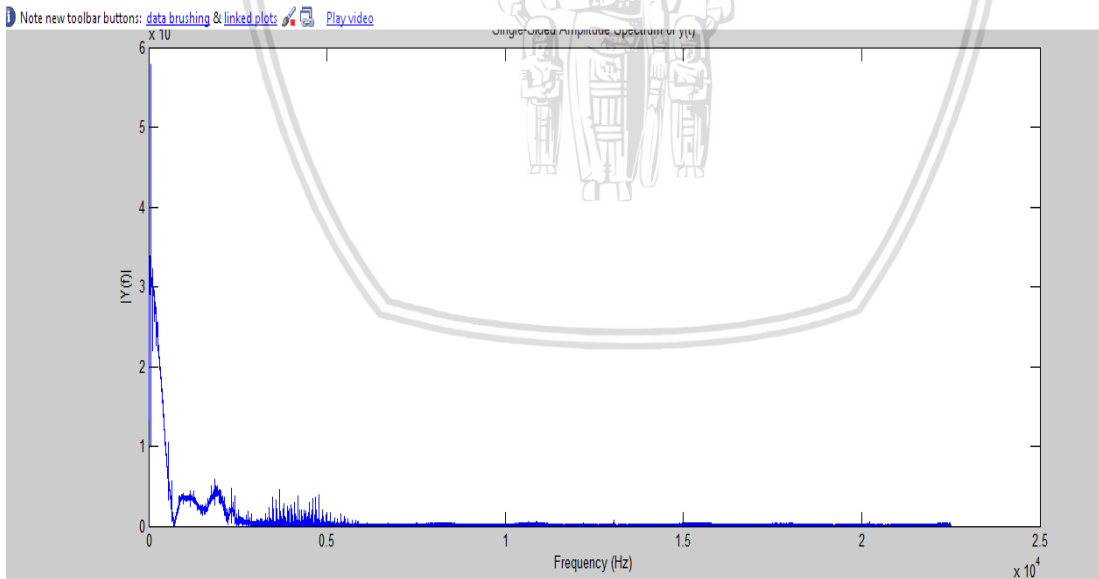
Gambar 5.14. Profil Pembebanan saat Benturan pada Pengujian Impak Zona HTHAZ
Skala Kalibrasi 1 volt = 76.92308 kg



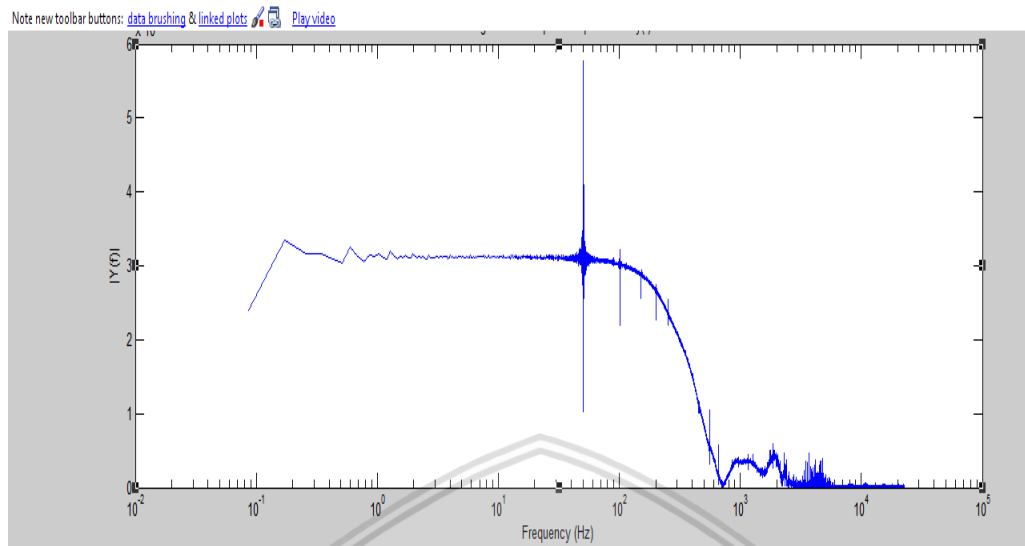
Gambar 5.15. *Capture image* Saat Benturan pada Pengujian impak Charpy Zona LTHAZ



Gambar 5.16. Grafik Proses Penyerapan Energi Saat Benturan pada Zona LTHAZ

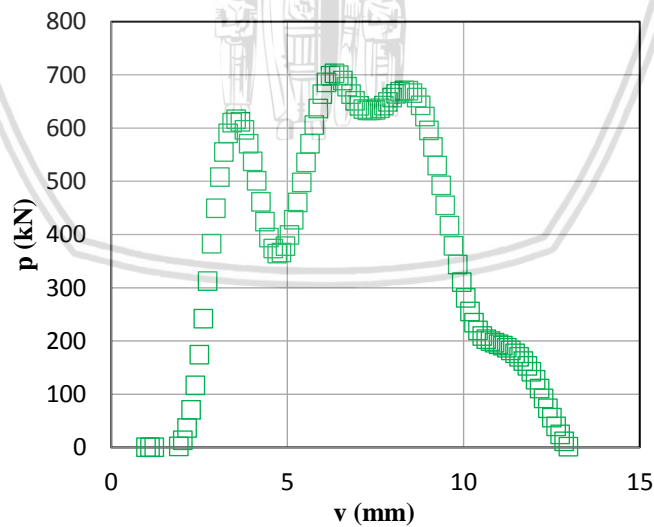


Gambar 5.17. Fast Fourier Transform pada Data Pengujian Impak Zona LTHAZ

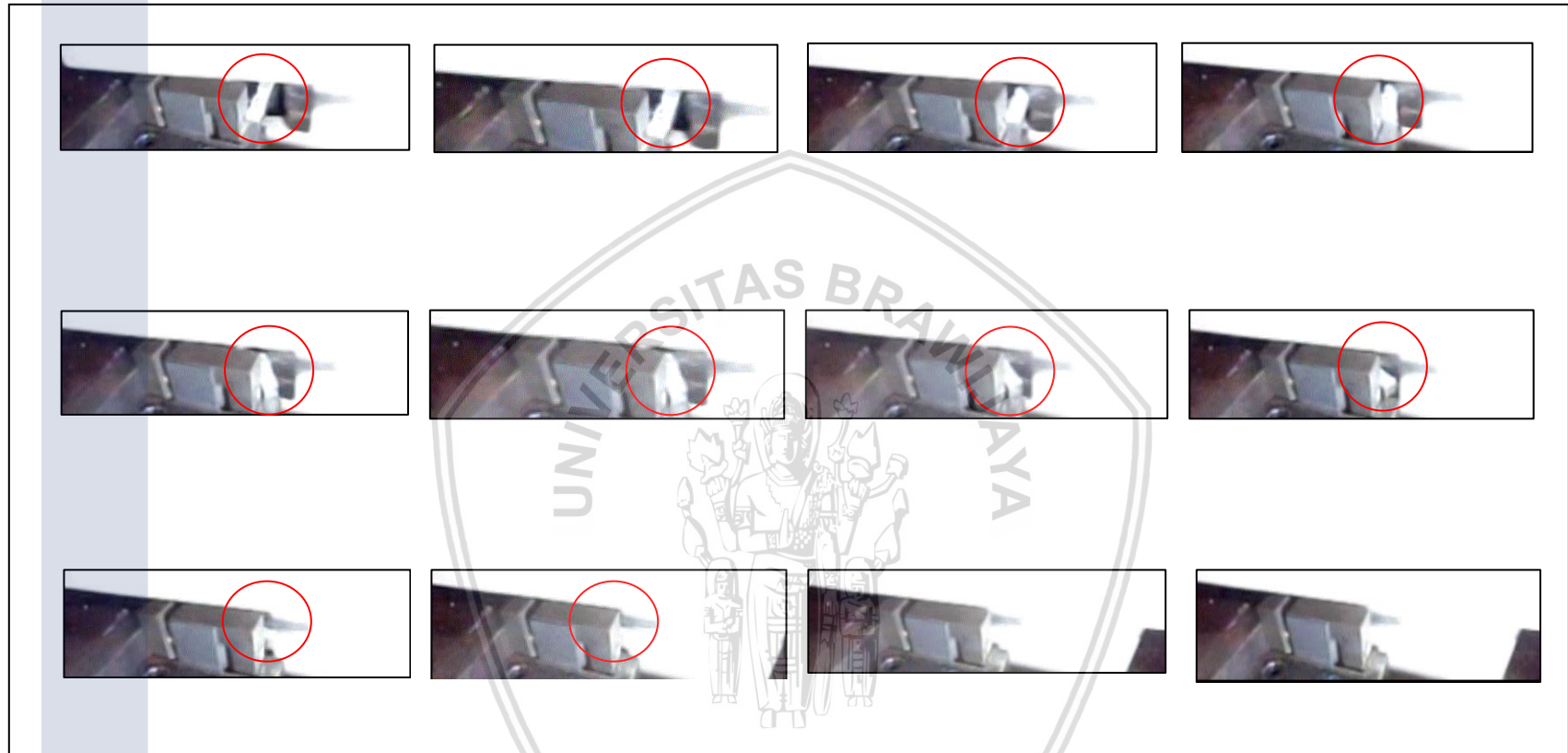


Gambar 5.18. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona LTHAZ dalam Skala Logaritmik

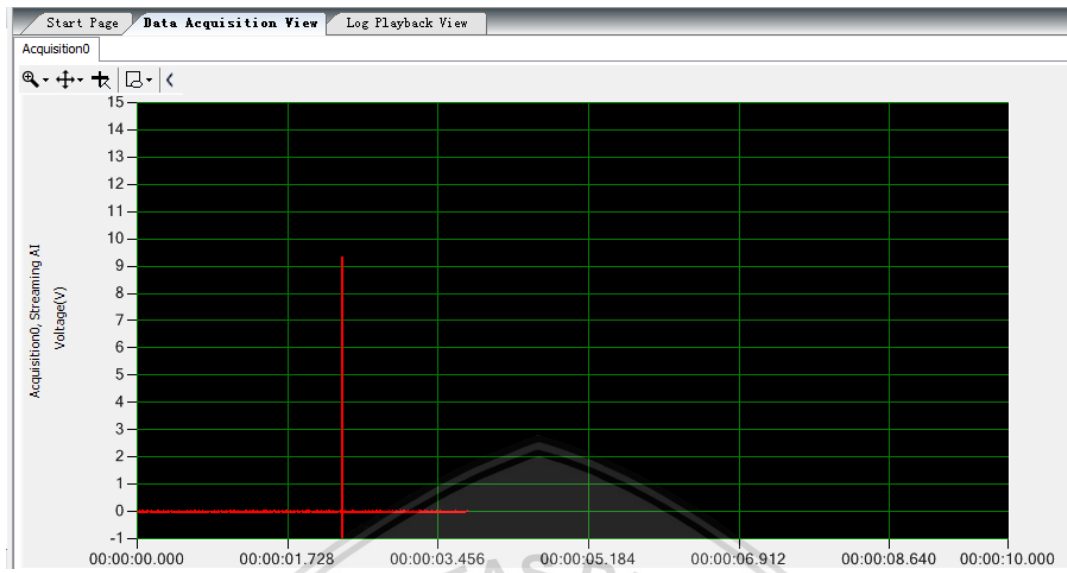
LTHAZ IMPACT TEST
LOAD (P) vS DISPLACEMENT (v)



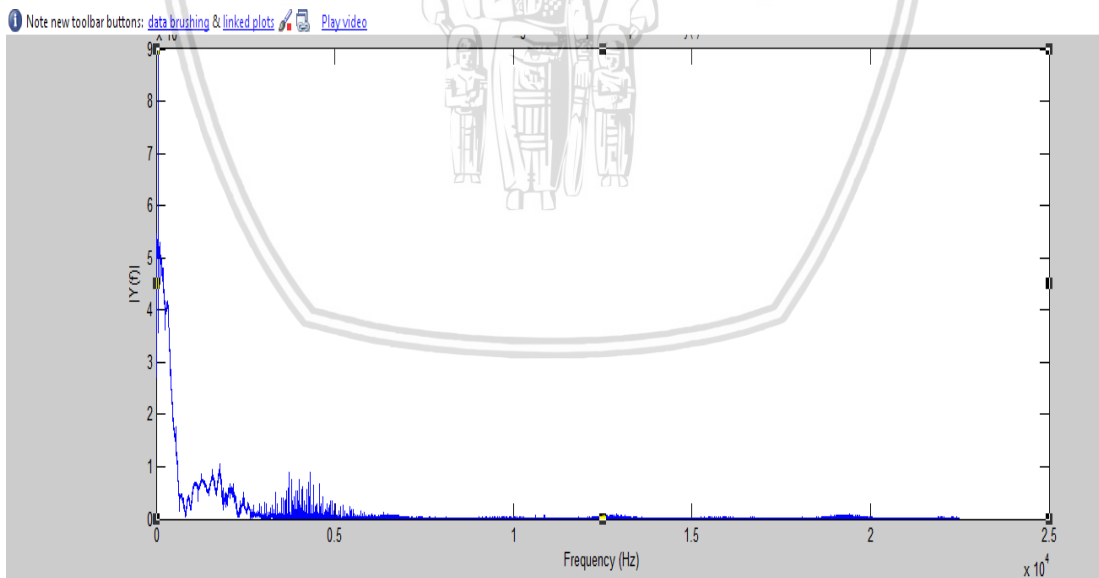
Gambar 5.19. Profil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona LTHAZ
Skala kalibrasi 1 volt = 76.9230 kg



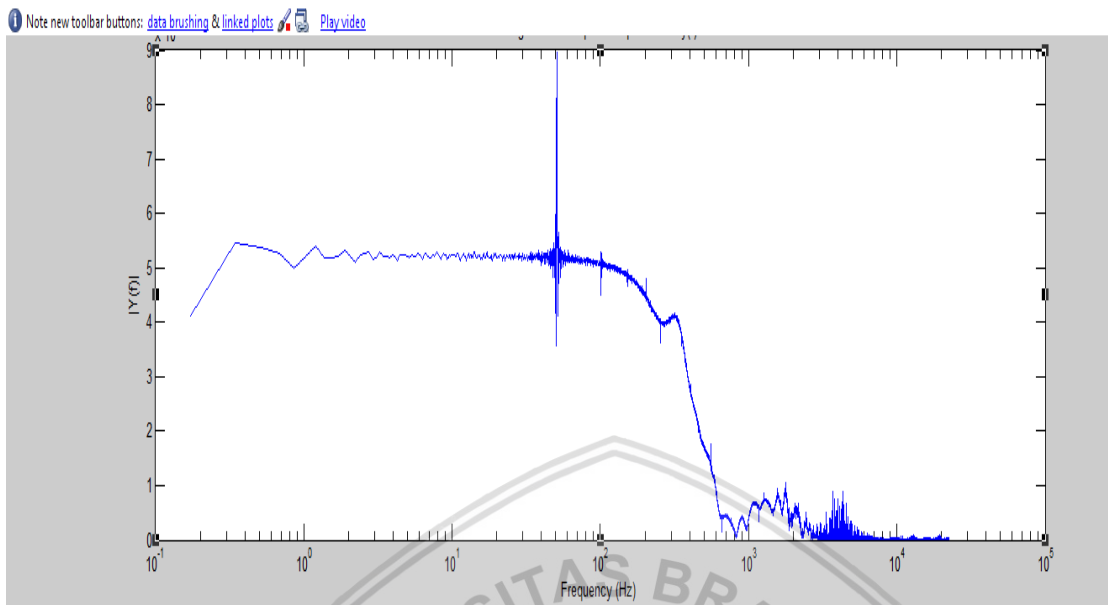
Gambar 5.20. *Capture Image Saat Benturan pada Pengujian Impak Charpy Zona Unaffected Base Metal*



Gambar 5.21. Grafik Proses Penyerapan Energi saat Benturan pada Zona *Unaffected Base Metal*

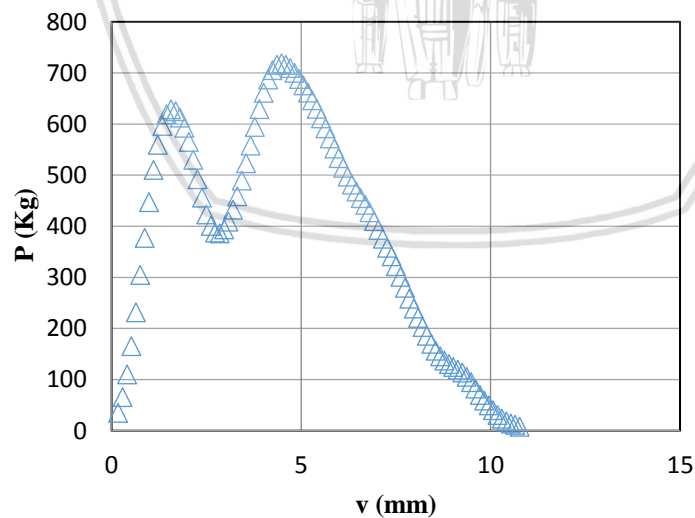


Gambar 5.22. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona *Unaffected Base Metal*



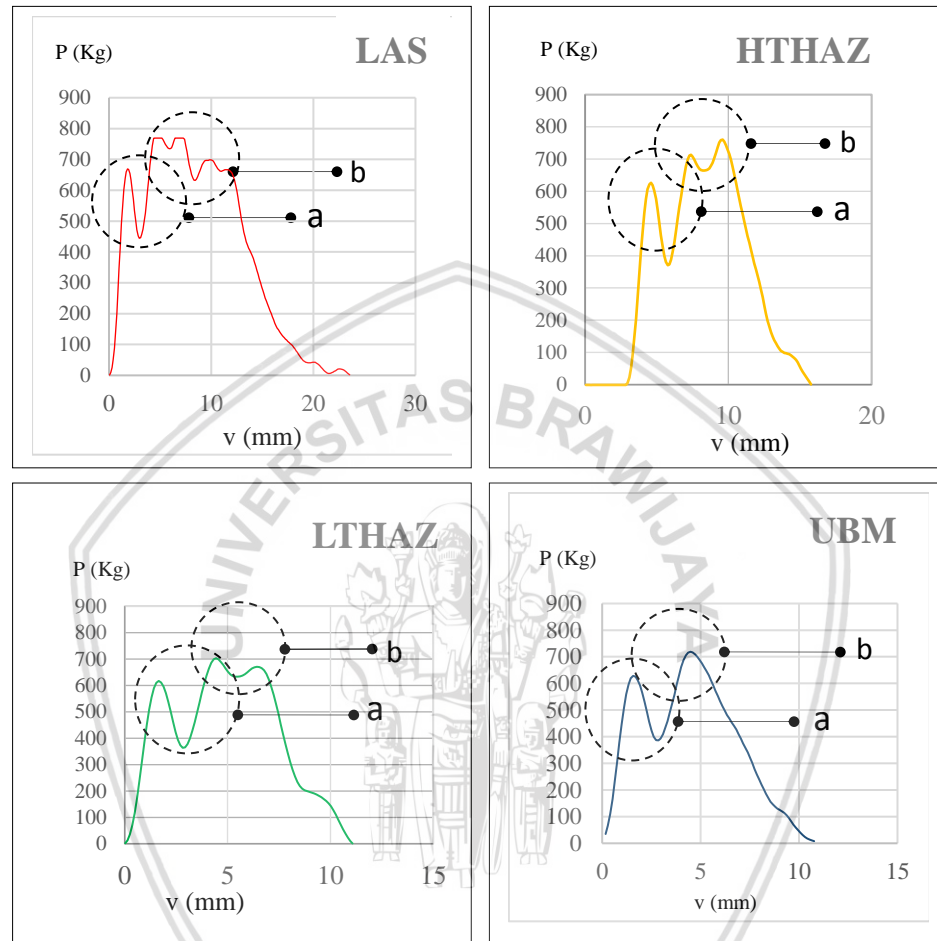
Gambar 5.23. *Fast Fourier Transform* pada Data Pengujian Impak Zona *Unaffected Base Metal* dalam skala Logaritmik

BASE METAL IMPACT TEST
LOAD (P) vs DISPLACEMENT (v)



Gambar 5.24. Profil Pembebanan Saat Benturan pada Pengujian Impak Zona UBM
Skala kalibrasi 1 volt = 76.92308 kg

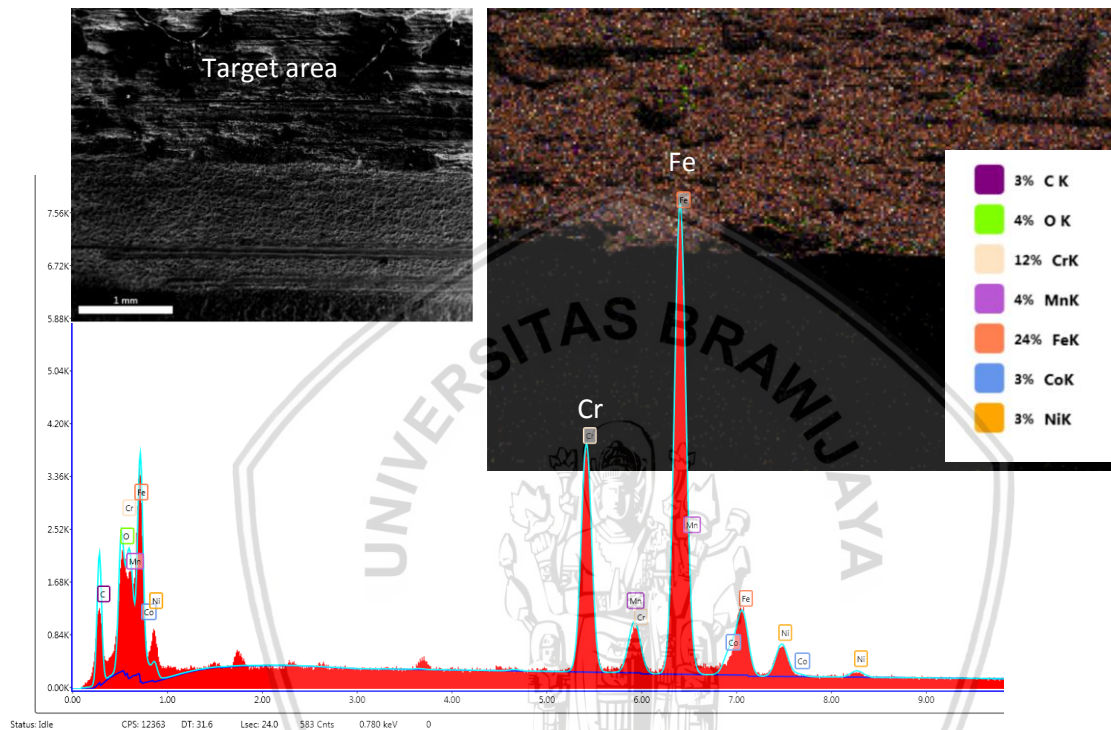
Profil pembebanan pada pengujian impact yang diperoleh dari data akuisisi dengan *sampling rate* 45.000 *sample/detik* seperti ditampilkan pada Gambar 5.25. menunjukkan fenomena *overshoot* negatif ‘a’ pada semua zona.



Gambar 5.25. *Overshoot* Negatif a dan Variasi Cacah Puncak b pada Pengujian Impact

Kehadiran atom Cr diduga menjadi agen penghambat deformasi plastis. Fenomena *overshoot* negatif ini dapat dijelaskan menggunakan teori dislokasi yaitu ketika keberadaan atom Cr dominan dalam baja *austenitic*, Cr akan berperan sebagai *interstitial solute* yang mengganggu gerakan dislokasi. Ketika gerakan dislokasi terhenti maka diperlukan gaya yang jauh lebih besar untuk membuatnya kembali bergerak akibatnya pada grafik *Load – Displacement* teramati beban naik tinggi.

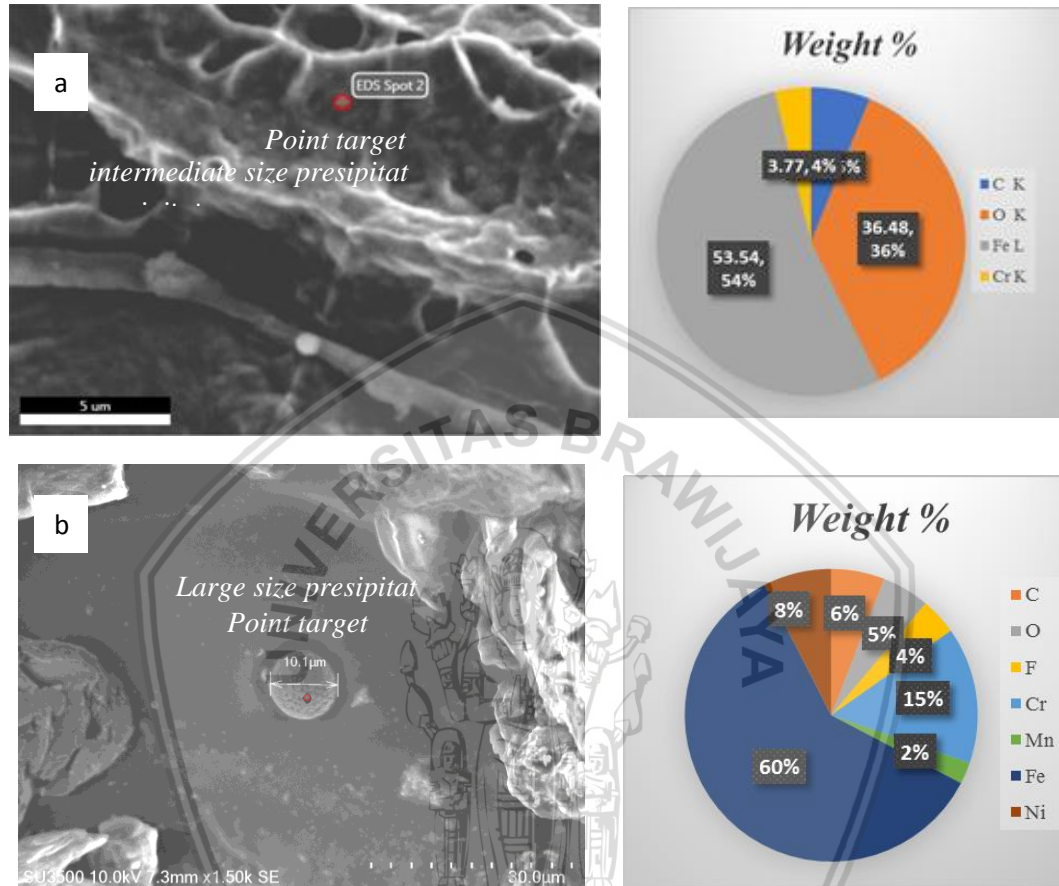
Keberadaan atom Cr yang cukup dominan pada wilayah *overshoot* terlihat pada pengamatan dan pemetaan menggunakan *Scanning Electron Microscope* - EDS seperti ditampilkan pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26. Hasil *Scanning Electron Microscope* – EDS Patahan pada Daerah *Overshoot* Negative Uji Impak

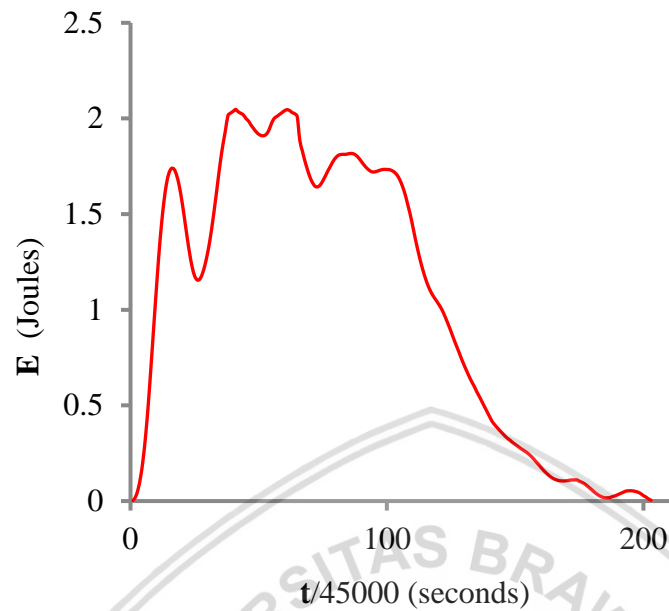
Disamping *overshoot* negatif, variasi cacah puncak 'b' pada grafik Load-Time juga merupakan temuan menarik. Cacah puncak teramati berkurang ketika jarak terhadap pusat pengelasan bertambah. Cacah puncak pada kasus ini memiliki hubungan dengan kehadiran precipitat. Merujuk pada tinjauan pustaka dalam bab terdahulu, Karbida krom merupakan precipitat dominan yang muncul pada peristiwa sensitisasi saat pengelasan *Stainless Steel*. Kesimpulan penelitian terdahulu (Van Zwieten, 1992) menyatakan bahwa kehadiran precipitat pada dislokasi mempengaruhi ketangguhan retak stainless steel tanpa dipengaruhi oleh struktur dan morfologinya. Precipitat

teridentifikasi pada pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* dan *point target* EDS seperti ditampilkan pada Gambar 5.27.

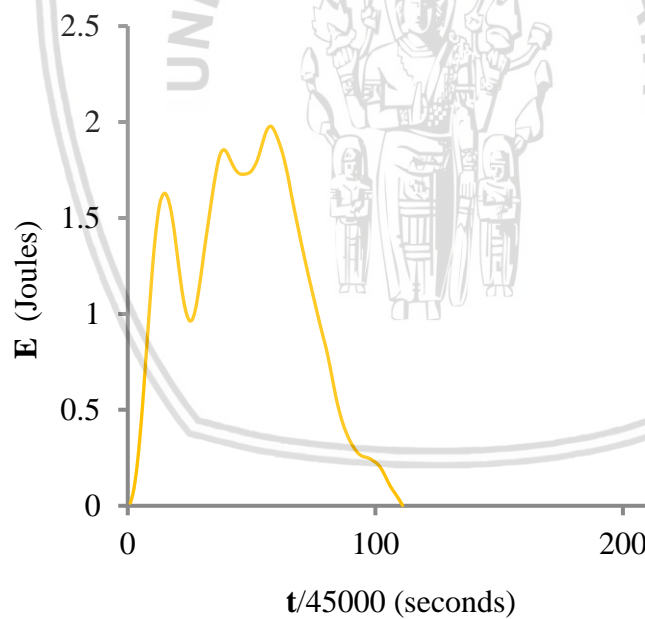


Gambar 5.27. Hasil *Scanning Electron Microscope* Patahan dan *point target* EDS pada Daerah Puncak Uji Impak : a. *Intermediate Size Precipitate*, b. *Large Size Precipitate*

Profil penyerapan energi zona las dan zona HTHAZ saat benturan ditampilkan pada Gambar 5.28. dan Gambar 5.29. Pada zona las tampak overshoot negatif a dan 4 cacah puncak b sementara pada zona HTHAZ terlihat overshoot negatif a dengan 2 cacah puncak b.



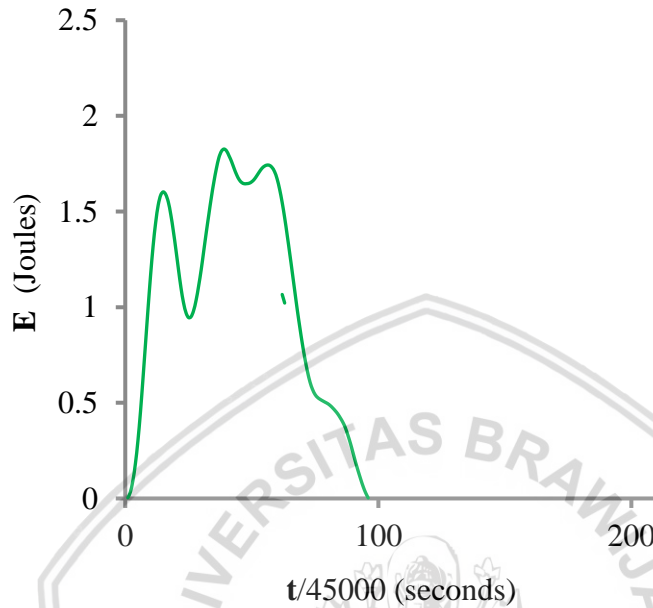
Gambar.5.28. Profil Penyerapan Energi Zona Las pada Pengujian Impak



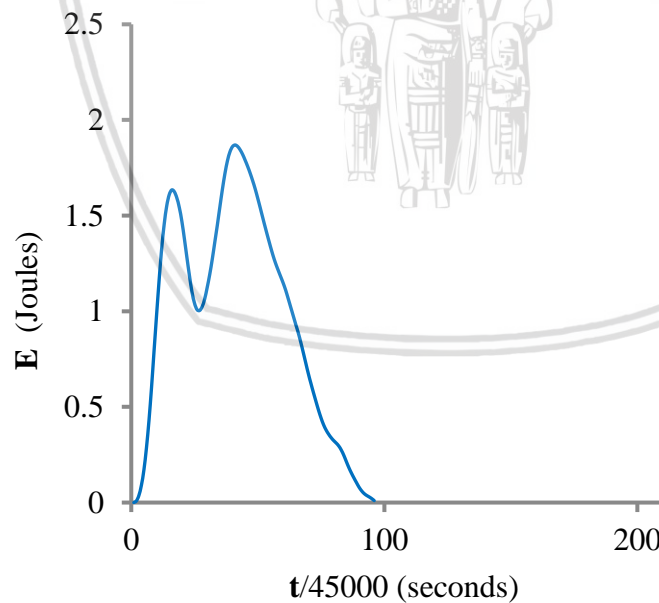
Gambar 5.29. Profil Penyerapan Energi Zona HTHAZ pada Pengujian Impak

Profil penyerapan energi zona LTHAZ dan zona UBM saat benturan ditampilkan pada Gambar 5.30. dan Gambar 5.31. Pada zona LTHAZ tampak *overshoot* negatif a

dan 2 cacah puncak b dengan profil yang berbeda dengan zona HTHAZ, sementara pada zona UBM terlihat overshoot negatif a dengan 1 cacah puncak b.



Gambar 5.30. Profil Penyerapan Energi Zona LTHAZ pada Pengujian Impak



Gambar.5.31. Profil Penyerapan Energi Zona UBM pada Pengujian Impak

Tabel 5.3. Energi yang Diserap Material pada Pengujian Impak Charpy

Zone	Post welding internal energy	
	(E _{pw}) Joules/cm ²	(E _{mw}) = $\int_0^z E_{pw} dz$ Joules/cm ³ zone volume
Fusion	268.94	196.33
HTHAZ	223.83	33.57
LTHAZ	133.73	42.79
Unaffected Base Metal	142.61	1254.90

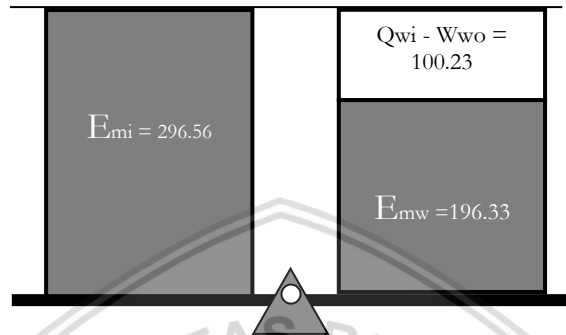
3.1. Calculated energy balance vs actual energy balance

Neraca energi harus memenuhi kaidah keseimbangan termodinamika pada setiap zona. Harga energi impact awal (E_{mi}) dan hasil pengujian impact pasca pengelasan (E_{mw}) menjadi acuan dalam penghitungan perubahan energi selama proses pengelasan ($Q_{wi}-W_{wo}$). Neraca keseimbangan energi hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 5.4

Tabel 5.4. Hasil perhitungan Neraca Keseimbangan Energi.

	FZ (J/0.73 cm ³)	HTHAZ (J/0.15 cm ³)	LTHAZ (J/0.32 cm ³)	UBM (J/8.8cm ³)
Initial Impact Energy (E_{mi})	296.56	60.93	130.00	3575.00
Welding energy (Q_{wi})	5412.53	279.01	802.00	15297.57
Energy consumption (W_{wo})	5312.30	251.65	714.79	12977.47
Post weld impact energy (E_{mw})	196.33	33.57	42.79	1254.90
$E_{mi} - E_{mw}$	100.23	27.36	87.21	2320.10

Kaidah keseimbangan termodinamik pada zona fusi terpenuhi bila perubahan energi pada proses pengelasan ($Q_{wi} - W_{wo}$) sebesar 100.23 Joules seperti ditampilkan pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32. Neraca Keseimbangan Energi pada zona fusi

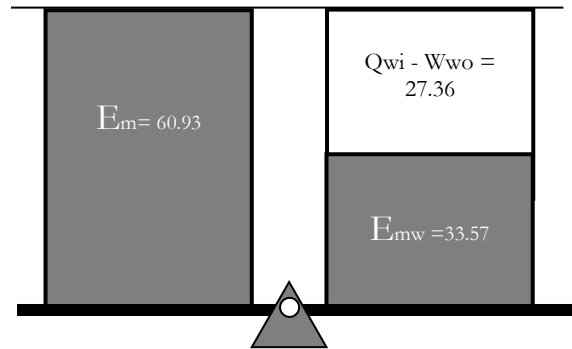
Mempertimbangkan keseimbangan termodinamik, neraca keseimbangan energi pada zona fusi menjadi:

$$E_{mi} = E_{mw} + (0.987 Q_{wi} - W_{wo})$$

$$\rightarrow E_{mi} = E_{mw} + \left(0.987 \left(\int_0^{r1} \frac{q}{2\pi r l^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r l^2}\right) - (\Delta H_{Tl} + \int_{T1}^{T2} C_p dT) \right) \right) \quad (5.1)$$

Prosentase konsumsi energi terhadap energi pengelasan yang terserap pada zona ini sebesar 98.5 %. Tingginya prosentase konsumsi energi pada zona fusi menunjukkan sebagian besar energi pengelasan yang terserap pada zona ini digunakan untuk proses *remelting*.

Menggunakan prosedur sebelumnya keseimbangan energi terpenuhi bila perubahan energi saat proses pengelasan ($Q_{wi} - W_{wo}$) sebesar 27.36 Joules Neraca Keseimbangan energi pada HTHAZ ditampilkan pada gambar 5.33.



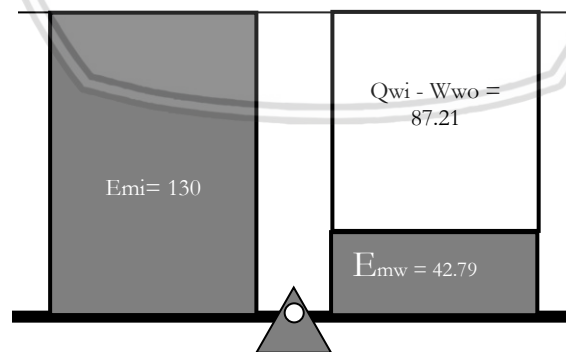
Gambar 5.33. Neraca Kesimbangan energi HTHAZ

Persamaan keseimbangan energi pada HTHAZ menjadi :

$$E_{mi} = E_{mw} + (0.25 Q_{wi} - W_{wo})$$

$$\rightarrow E_{mi} = E_{mw} + (0.25 \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r r^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right) \right)) \quad (5.2)$$

Pada zona LTHAZ kaidah termodinamika seperti ditampilkan pada neraca keseimbangan energi dalam Gambar 5.34 terpenuhi bila perubahan energi saat proses pengelasan ($Q_{wi} - W_{wo}$) sebesar : 87.21.



Gambar 5.34. Neraca keseimbangan energi LTHAZ

Dengan cara yang sama persamaan keseimbangan energi pada LTHAZ disempurnakan menjadi:

$$E_{mi} = E_{mw} + (0.35 Q_{wi} - W_{wo})$$

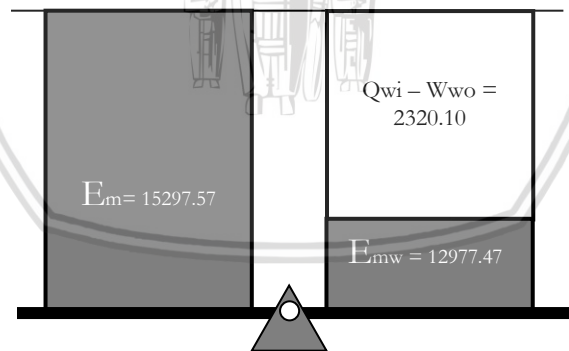
$$\rightarrow E_{mi} = E_{mw} + (0.35 \left(\int_{r_2}^{r_3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) \right) - \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right)) \quad (5.3)$$

Energi terserap pada zona UBM sebesar 15297.57 joules atau setara dengan 68.03 % dari pasokan energi sebesar 22487.4 pada zona ini. Persamaan keseimbangan energi pada zona uBM perlu disempurnakan menjadi :

$$E_{mi} = E_{mw} + (0.68 Q_{wi} - W_{wo})$$

$$\rightarrow E_{mi} = E_{mw} + (0.68 \left(\int_{r_3}^{r_4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r'^2}\right) \right) - \left(\frac{\sigma_{rs}^2}{2E} \right)) \quad (5.4)$$

Profil keseimbangan energi pada zona UBM ditampilkan pada Gambar 5.35. berikut ini :



Gambar 5.35. Neraca keseimbangan energi uBM

Prosentase konsumsi energi terhadap energi yang terserap pada masing-masing zona bervariasi dengan prosentase tertinggi terjadi pada zona fusi dan semakin berkurang menjauhi pusat pengelasan seperti ditampilkan pada Tabel 5.4. Fakta ini menunjukkan *usefulness* yang besar pada zona tersebut. Semakin jauh dari pusat

pengelasan entropi semakin besar yang berarti semakin besar suplai energi pengelasan tidak dimanfaatkan untuk *useful work*. Hal ini dapat dijelaskan dengan *Entropy State Function* seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\delta S = \frac{\delta Q}{T} \quad (5.5)$$

dengan :

δS : perubahan entropi

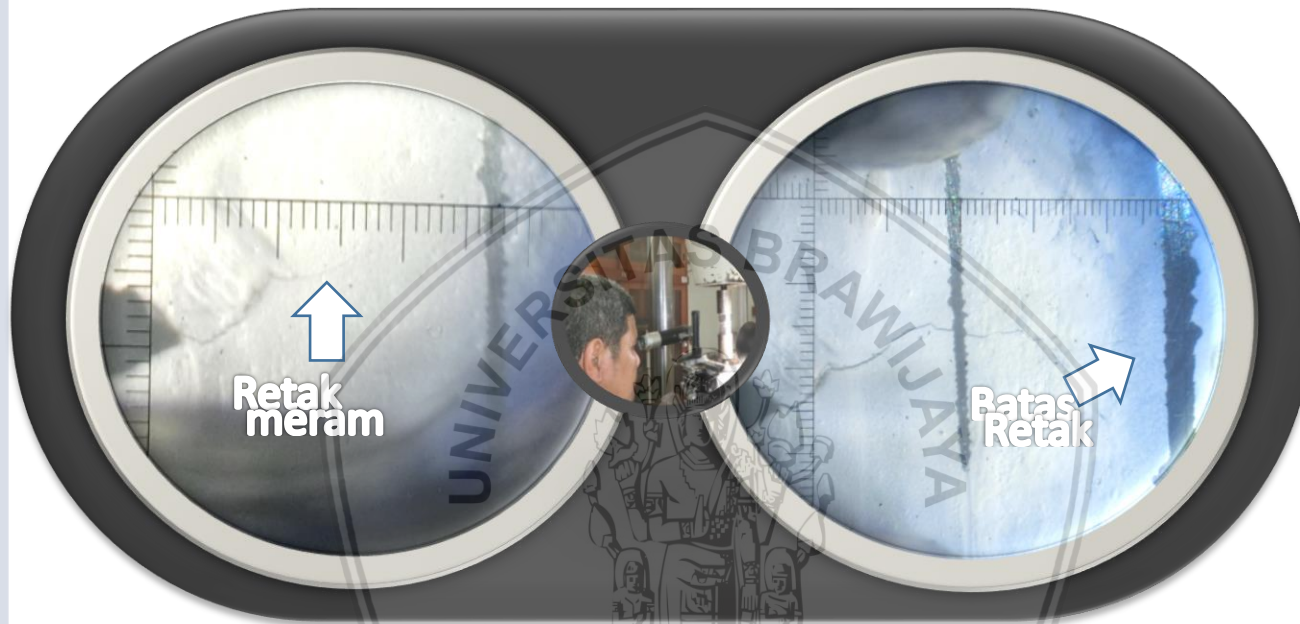
δQ : jumlah energi yang diserap sistem ; T : temperatur absolut

Persamaan entropi di atas menunjukkan hubungan antara entropi dengan energi yang digunakan untuk proses yang khas pada setiap zona secara makroskopik. Energi yang disuplai pada temperatur tinggi akan lebih banyak dimanfaatkan untuk *proses* pada setiap zona dibandingkan dengan energi yang diserap pada temperatur rendah (Rudolf, 1867)

Secara mikroskopis, jumlah energi yang dapat disebarkan dalam molekul tergantung dari keadaannya (Guillermrt, 1992). Pada kristal solid panas, molekul bergetar lebih banyak dibanding pada kristal solid pada suhu rendah. Hal inilah yang mengakibatkan kristal solid dalam keadaan panas menyerap energi lebih dibandingkan kristal solid pada suhu rendah (Lambert, 2002)

Energi las pada zona fusi menyebabkan partikel bergerak bebas mengakibatkan material melebur. Setelah suhu turun atom-atom pada zona fusi mengkonsolidasi diri dan menempati posisi semestinya/ struktur sempurna. Hal inilah yang diduga menjadi sebab tingginya ketangguhan retak material pada zona fusi. Pada Zona HTHAZ energi las untuk grain growth, sensitisasi dan pembangkitan tegangan sisa. Peningkatan ukuran butir dan presipitat meningkatkan ketangguhan retak material meski tidak setinggi ketangguhan retak zona fusi. Akibat suhu relatif rendah pembentukan presipitat pada zona LTHAZ tidak intensif. Energi yang terserap tidak banyak digunakan untuk *useful work*, atom-atom pada zona ini bergeser dari posisi semestinya berakibat nilai ketangguhan retaknya rendah. Pada zona UBM pegelasan tidak mempengaruhi mikrostruktur.

5.5. Hasil pengujian Fracture Resistance



Gambar 5.36. Pengamatan Pembentukan Retak Awal
dengan Beban Fatik Menggunakan *travelling microscope*
Kapasitas Beban 2 Ton ; P_{max} : 300 kg , P_{min} : 30 kg

Pengamatan visual retak tahap awal pada pengujian *fracture resistance* sesuai standard ASTM E 1820 ditampilkan pada Gambar 5.36. Pembentukan retak alami, specimen diberi beban fatik 10^4 sampai dengan 10^6 siklus dengan P_{mak} 15% dari kapasitas beban terpasang 2 Ton dan P_{min} 1.5% dari kapasistas beban terpasang 2 Ton sesuai dengan rumus:

$$P_f = \frac{0.4Bb_o^2\sigma_Y}{2a(2W+a_o)} \quad (5.6)$$

dengan:

B : tebal specimen σ_Y : tegangan yield

b_o : $W - a_o$ W : lihat Gambar 4.81 a_o : $0.45W - 0.7 W$

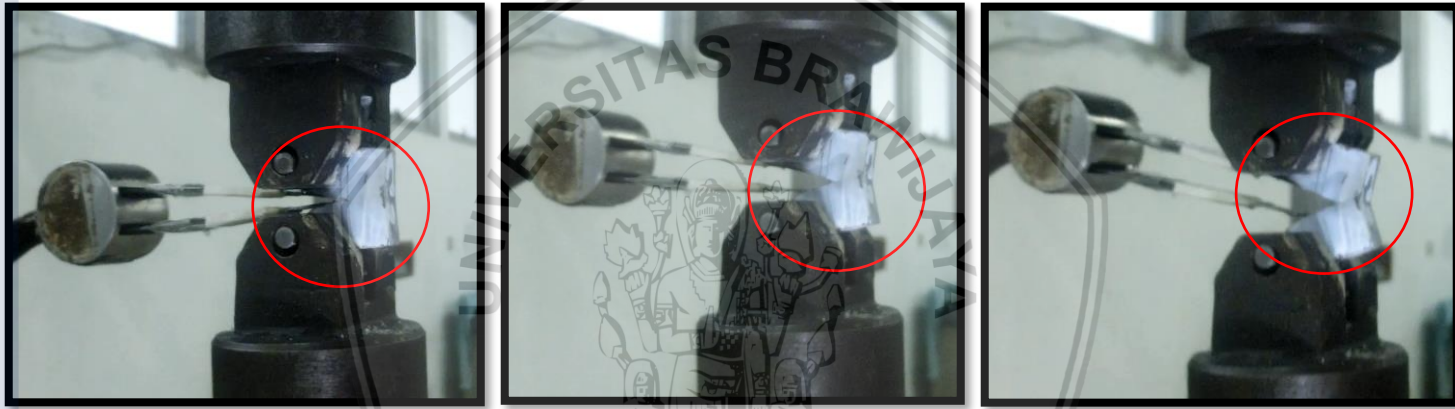
Berturut-turut panjang retak awal a_o untuk specimen pada zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan uBM adalah : 11.3 mm , 10.8 mm, 11.5 mm, 11.1 mm



Gambar 5.37. Pengamatan Perambatan Retak Saat Proses *Unloading/loading* pada Pengujian *Fracture Resistance*

Kapasitas beban 2 Ton ; beban awal 300 kg dengan Kenaikan Beban 50 kg.

Setelah panjang retak awal tercapai, dilakukan prosedur *loading/unloading*. Gambar 5.37 menunjukkan plastisitas pada pengamatan perambatan retak saat proses *loading/unloading*.



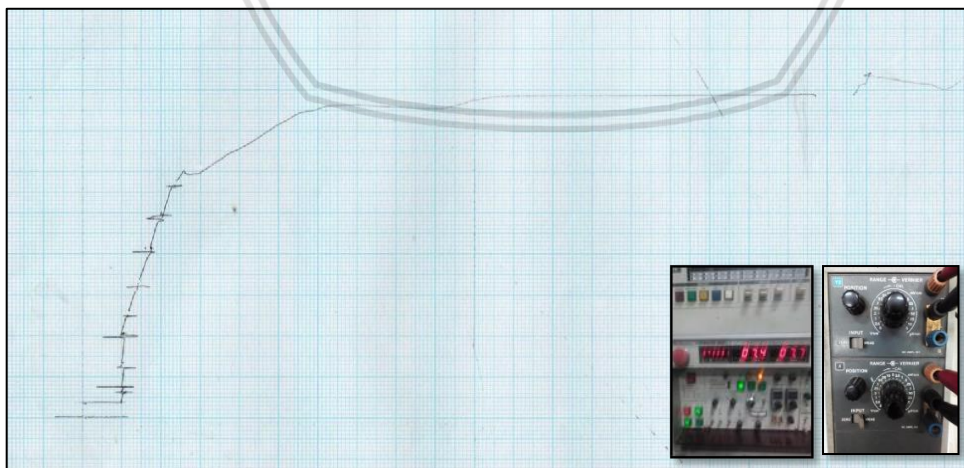
Gambar 5.38. Pengukuran *displacement* menggunakan *displacement gage* proses *unloading/loading* pada pengujian *Fracture Resistance*

Displacement gauge dipasang pada specimen sesuai standar pengujian ASTM E 1820. Posisi *displacement gauge* pada pengujian *fracture resistance* saat proses *loading/unloading* ditampilkan pada Gambar 5.38.

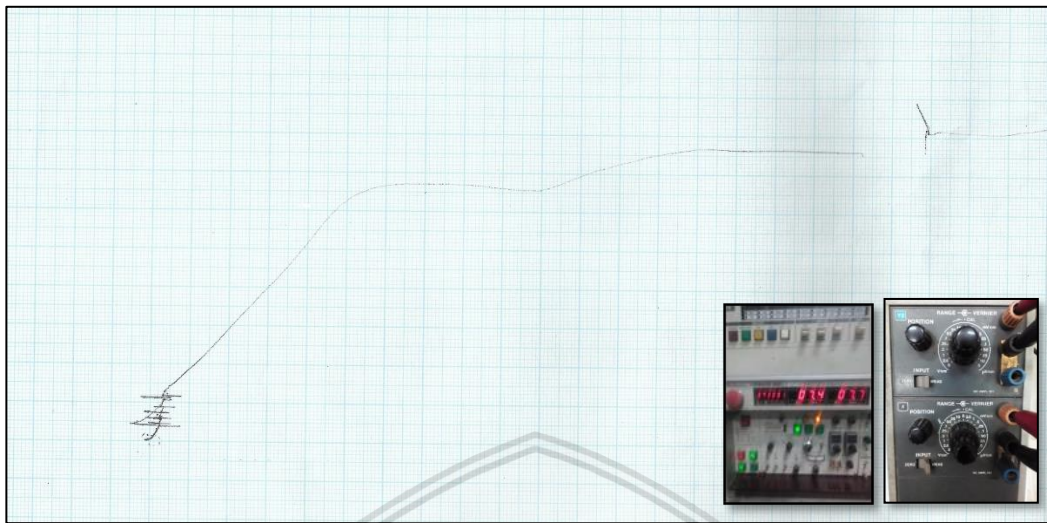
Output ideal pengujian *fracture resistance* adalah plot Beban (P) vs *displacement* (v) serta harga Δa . Namun pengamatan pertambahan retak Δa sangat sulit dilakukan. Hal ini disebabkan oleh peralatan yang kurang sempurna, skill pengujian kurang atau *material restriction* (Kang Lee, 1995). Plot beban (P) vs *displacement* (v) pada Zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan uBM secara berurutan ditampilkan pada Gambar 5.39 sampai dengan 5.42.



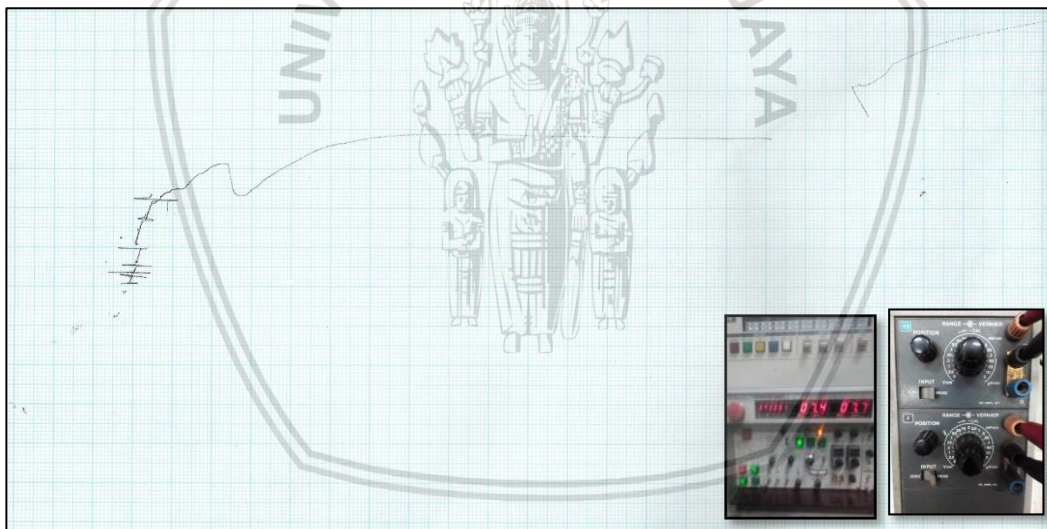
Gambar 5.39. *Displacement* (v) vs Gaya (P) pengujian *Fracture Resistance* Zona Las



Gambar 5.40. *Displacement* (v) vs Gaya (P) Pengujian *Fracture Resistance* HTHAZ



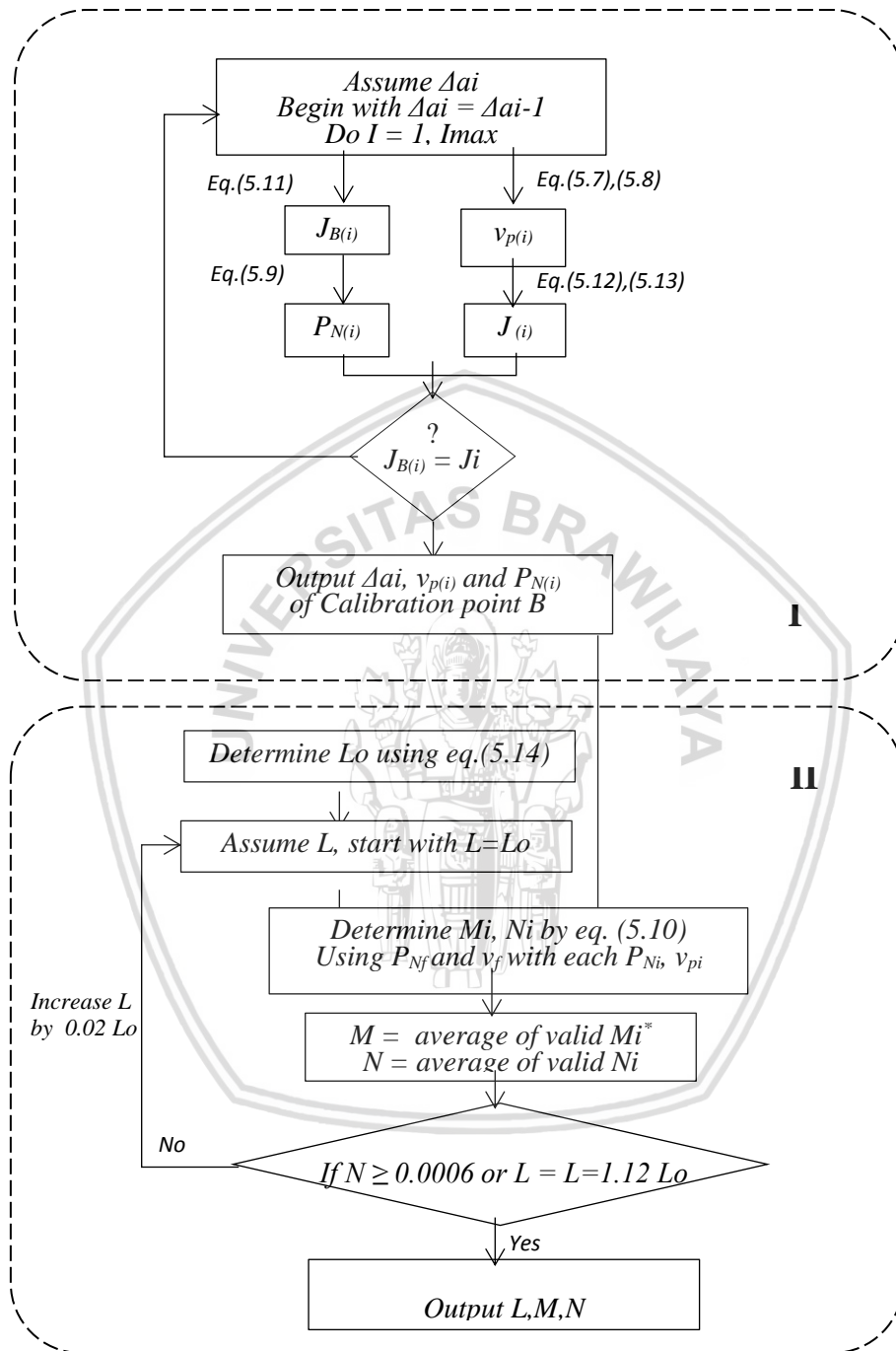
Gambar 5.41. *Displacement (v) vs Gaya (P) Pengujian Fracture Resistance LTHAZ*



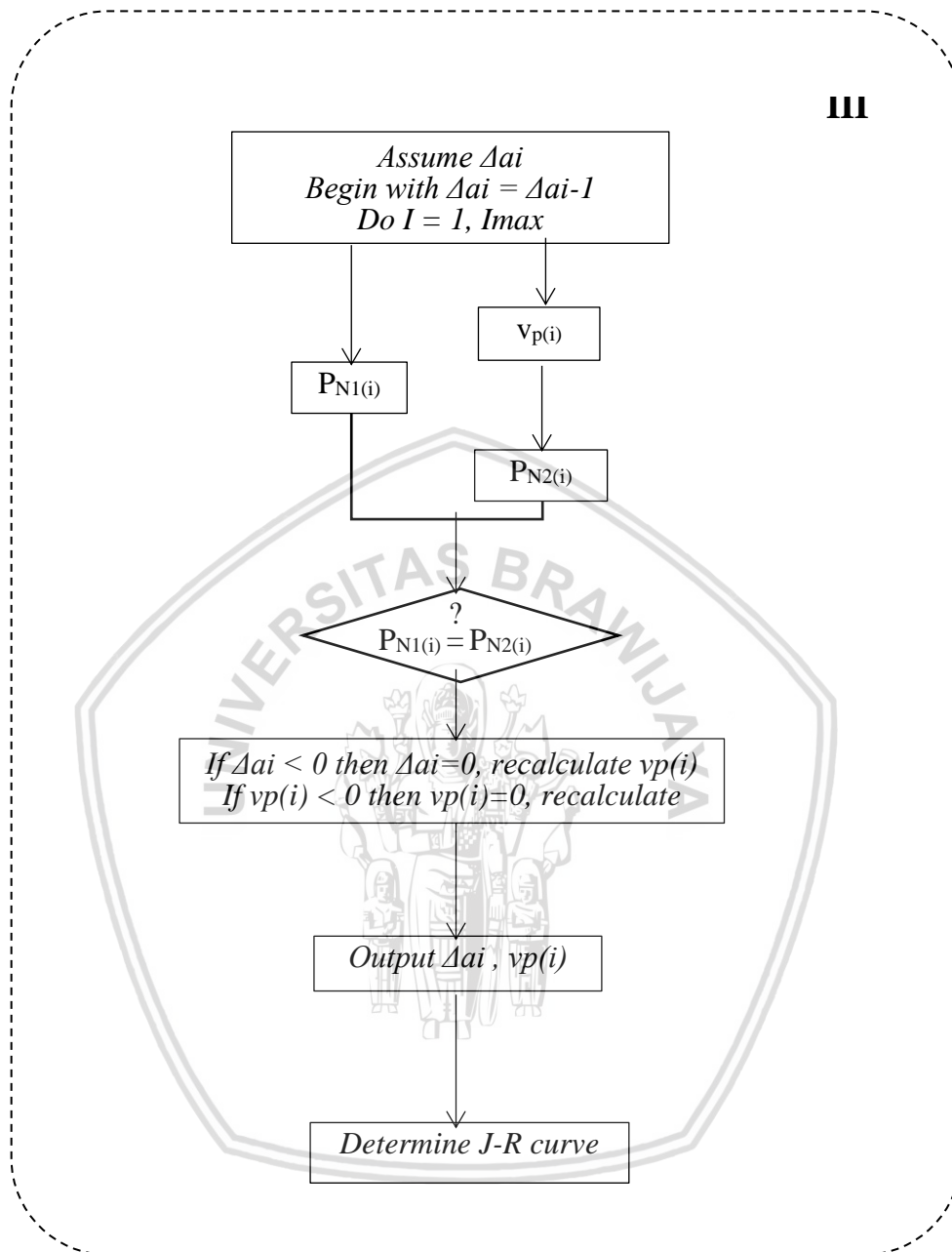
Gambar 5.42. *Displacement (v) vs Gaya (P) Pengujian Fracture Resistance UBM*

Ketika harga Δa tidak diperoleh pada pengujian fracture resistance, kurva J-R tidak langsung bisa di tampilkan. Kang Lee (1995) menggunakan pendekatan normalisasi untuk menentukan harga Δa dari plot beban (P) vs *displacement (v)*.

Diagram alir prosedur normalisasi ditampilkan pada Gambar 5.43 dan 5.44.



Gambar 5.43. Diagram alir untuk mendapatkan konstanta L,M,N.
(Sumber: Kang Lee, 1995)



Gambar 5.44. Diagram alir untuk mendapatkan harga Δa_i , $v_p(i)$.

(Sumber: Kang Lee, 1995)

Contoh proses normalisasi data beban (P) dan *displacement* (v) pada zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan uBM yang ditampilkan pada Table 5.5 dan Tabel 5.6 serta Gambar 5.38

Tabel 5.5. Iterasi untuk mendapatkan Δa_i , v_i dan $P_{N(i)}$

v_i	P_i	C_{Li}	da	J_{bi}	P_{Ni}	$ve(i)$	$vpl(i)$	K	J_{pl}	J_i	$\gamma_{ai/W}$	ai/W	$f(ai/W)$	u	C_{ci}	O	
	0	0														11.6	
1	1	342.3	0.000345892	0.001614	11.6172	13.8134	0.1184	0.8816	542.1723517	-1.5867893	11.6172	1.3192	0.83648	56.6676826	0.04380236	0.00292	11.60161
2	2	465.54157	0.000346049	0.015125	108.902	18.7945	0.1611	1.8389	1532.828585	3.36180138	108.902	1.31914	0.89774	117.7			11.61674
3	3	$C_{Li(i)} = \frac{1}{EB_e} \left(\frac{W+a_i}{W-a_i} \right)^2 [2.1630 + 12.219(a_i/W) - 20.065(a_i/W)^2 - 0.9925(a_i/W)^3 + 20.609(a_i/W)^4 - 9.9314(a_i/W)^5]$	166	21.7893	0.18684	2.81316	2604.312697	9.6057	$\gamma_{(i-1)} = 1.0 + 0.76 b_{(i-1)} \sqrt{W}$	117.7				$u = \frac{1}{[B_e EC_{ci(i)}]^{1/2} + 1}$			11.66039
4	4		186	24.1316	0.20716	3.79284	3655.556613	16.602	P_i	876							11.74606
5	5		184	26.336	0.22656				$K_{(i)} = \frac{P_i}{(BB_N W)^{1/2} f(a_i/W)}$	953							11.88673
6	6		187	28.7371	0.24808					527							12.09491
7	7	688.28282	0.00039895	0.287783	2072.04	31.6491	0.27459	7.69029	7729.08029	46.3656055	2729.77						12.38269
8	8	712.02471	0.000434972	0.379135	2729.77	35.4582	0.30971	7.69029	7729.08029	46.3656055	2729.77						12.76183
9	9	732.96653	0.000489605	0.481904	3469.7					379	3469.71						13.24373
10	10	751.69963	0.000573777	0.595782	4289.6					385	4289.63						13.83951
11	11	768.64578	0.000573777	0.720628	5188.5					157	5188.52						14.56014
12	12	784.1164	0.000940091	0.85555	6159.96	80.5308	0.73714	11.2629	11651.62428	61.7283907	6159.96	1.20671	0.96196	531.63176	0.00964476	0.06464	15.41569
13	13	798.348	0.000885906	1.001466	7111.46					63.1225066	7210.56	1.1742	0.96348	565.291578	0.00925413	0.07027	16.41716
14	14	811.52439	0.002393924	1.15437	8311.46	204.553	1.94273	12.0573	13570.5311	39.195652	8311.46	1.13615	0.96482	598.274167	0.00890756	0.07589	17.57153
15	15	823.79133	0.005601929	1.314076	9461.35	479.122	4.61482	10.3852	34520.99676	-10.253022	9461.35	1.09228	0.96603	630.643899	0.00859735	0.08152	18.8856
16	16	835.26627	0.005601929	1.49022	10729.6	2592.9	4.6791	11.3209	15465.93956	-14.80641	10729.6	1.04235	0.96712	662.454946	0.00831753	0.08715	20.37582

Selain merujuk persamaan-persamaan pada standar pengujian ASTM E 1820 juga melibatkan persamaan (5.7) sampai dengan persamaan (5.14) di bawah ini:

$$v_i = v_{e(i)} + v_{p(i)} \quad (5.7)$$

$$P_{N(i)} = \frac{P_i}{WB \left(\frac{b_i}{W} \right) \eta_{pl}} \quad (5.9)$$

$$v_{e(i)} = P_i C(a_i/W) \quad (5.8)$$

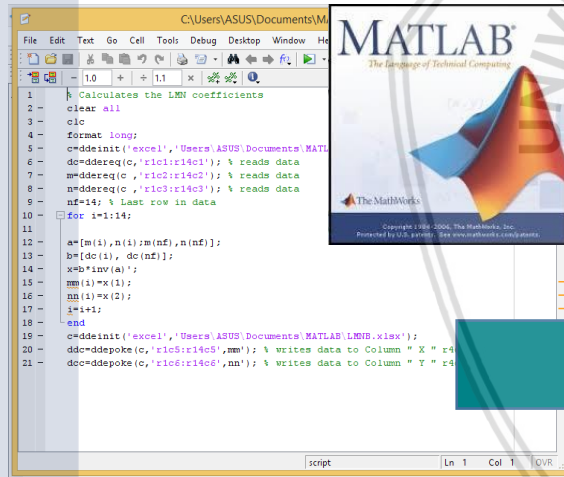
$$P_{N(i)} = H(v_{p(i)}/W) = \frac{(vp(i)/L + M \frac{vp(i)}{W}) (\frac{vp(i)}{W})}{N + (\frac{vp(i)}{W})} \quad (5.10)$$

$$J_{bi} = 2\sigma_{\gamma}\Delta a_i$$

$$J_{P(i)} = [J_{P(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl}}{biBN}\right) \frac{(Pi+Pi-1)(v_{p(i)}-v_{p(i-1)})}{2}] [1 - \gamma \frac{(a_i-a_{i-1})}{b_i}] \quad (5.13)$$

$$J_i = \frac{K_i^2(1-v^2)}{E} + J_{P(i)}$$

$$L = L_o = \frac{P_{max}}{WB(\frac{W-a_o}{W})\eta_{pl}} \quad (5.14)$$



L	Cconstruct	Mconstruct	Nconstruct	M	N
20.01750454	-0.27348	0.00194	-13.8134	344.516	0.06826
20.01750454	-0.11244	0.00845	-18.7945	414.367	0.19237
20.01750454	0.249213	0.01978	-21.7893	612.855	0.54503
20.01750454	0.780207	0.03596	-24.1316	1785.87	2.62921
20.01750454	1.508038	0.05696	-26.336	-1259.95	-2.7825
20.01750454	2.507721	0.08271	-28.7371	-414.551	-1.28043
20.01750454	3.911375	0.11308	-31.6491	-233.999	-0.95963
20.01750454	5.937166	0.14785	-35.4582	-157.305	-0.82336
20.01750454	8.951496	0.18667	-40.7358	-115.521	-0.74912
20.01750454	13.60178	0.2289	-48.4473	-89.2531	-0.70245
20.01750454	21.32808	0.27873	-60.4155	-67.2753	-0.6634
20.01750454	34.07763	0.31713	-80.5308	-55.8502	-0.6431
20.01750454	60.50246	0.37778	-118.454	-23.4328	-0.5855
20.01750454	111.25	0.36344	-204.553	0	-0.5
20.01750454	238.394	0.26963	-479.122		
20.01750454	1456.365	0.32041	-2592.9		
20.01750454				789.401	0.85872

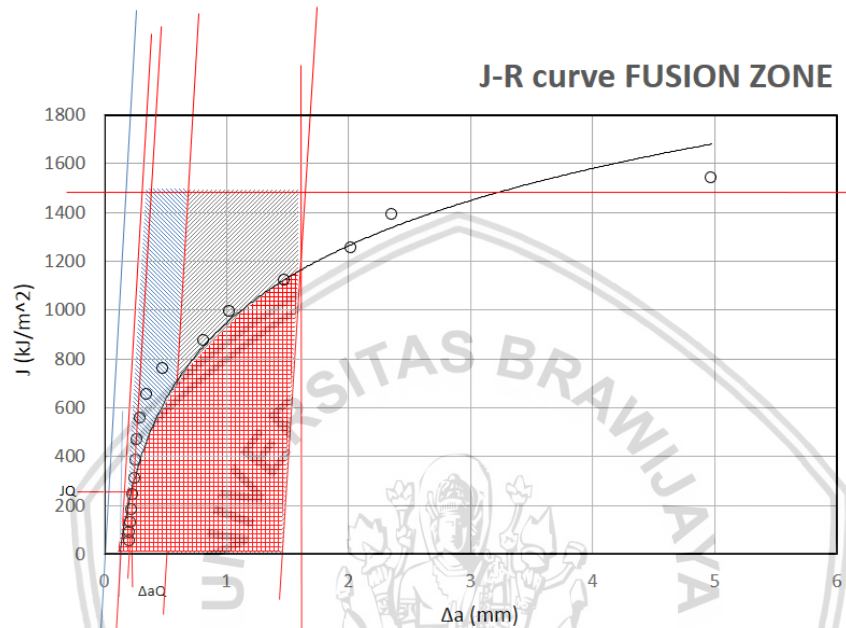
Gambar 5.45. Penggunaan *matlab* untuk mendapatkan konstanta Normalisasi L,M dan N

Tabel 5.6. Iterasi untuk mendapatkan Δa dan J

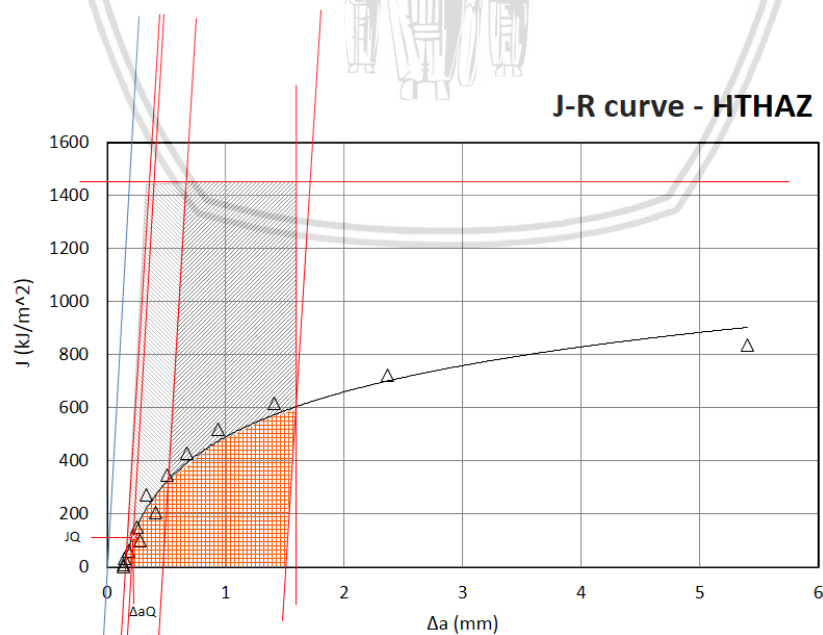
0	v_i	P_i	C_{li}	da	J_{bi}	$PN1i$	$ve(i)$	$vpl(i)$	K	J_{pl}	J_i	gamma	ai/W	$f(ai/W)$	u	C_{ci}	L	M	N	$PN2i$
11.6	0	0																		
3.4109	1	342.3	4.48607E-05	-8.1891	-58961.5	3.198	0.01536	0.98464	542.172	2.20859	15.41259	2.07119	0.83648	56.6677	0.0438	0.00292	20.0175	789.401	0.85872	3.193
8.8109	2	465.542	0.000169472	5.4	38880	10.142	0.0789	1.9211	1532.83	1.45854	106.99876	1.5548	0.89774	117.799	0.02675	0.00811	20.0175	789.401	0.85872	9.642
11.1789	3	537.633	0.000307926	2.368	17049.6	19.53	0.16555	2.83445	2604.31	3.88473	308.54589	1.67002	0.92046	173.305	0.02059	0.01387	20.0175	789.401	0.85872	18.68
12.5841	4	588.783	0.000462882	1.4052	10117.4	31.06	0.27254	3.72746	3655.56	7.56161	607.81947	1.7066	0.93238	222.128	0.0174	0.01955	20.0175	789.401	0.85872	29.81
13.5195	5	628.458	0.000631272	0.9354	6734.88	44.301	0.39673	4.60327	4691.79	12.3207	1001.1194	1.72445	0.94009	267.096	0.01536	0.0252	20.0175	789.401	0.85872	42.64
14.1925	6	660.875	0.000810522	0.673	4845.6	58.971	0.53565	5.46435	5715.18	18.0544	1485.2583	1.73443	0.94562	309.397	0.0139	0.03085	20.0175	789.401	0.85872	56.89
14.702	7	688.283	0.000997994	0.5095	3668.4	74.821	0.6869	6.3131	6727.22	24.7049	2057.5393	1.74064	0.94983	349.682	0.0128	0.03649	20.0175	789.401	0.85872	72.36
15.0315	8	712.025	0.001153604	0.3295	2372.4	88.86	0.82139	7.17861	7729.08	33.4338	2716.8403	1.74748	0.95319	388.363	0.01192	0.04212	20.0175	789.401	0.85872	89.42
15.4419	9	732.967	0.001400271	0.4104	2954.88	110.1	1.02635	7.97365	8721.72	39.6021	3456.5207	1.7444	0.95594	425.719	0.0112	0.04775	20.0175	789.401	0.85872	106.1
15.697	10	751.7	0.001400271	0.2551	1836.72	127.8	1.05258	8.94742	9705.92	51.6778	4283.273	1.75081	0.95826	461.952	0.0106	0.05338	20.0175	789.401	0.85872	127.8
15.9743	11	768.646	0.001848274	0.2773	1996.56	150.8	1.42067	9.57933	10682.4	56.7318	5182.577	1.74946	0.96024	497.217	0.01009	0.05901	20.0175	789.401	0.85872	142.5
16.1154	12	784.116	0.00200097	0.1411	1015.92	166.1	1.56899	10.431	11651.6	70.2482	6168.4778	1.75464	0.96196	531.632	0.00964	0.06464	20.0175	789.401	0.85872	163.1
16.2983	13	798.348	0.002227035	0.1829	1316.88	187.6	1.77795	11.2221	12614.2	80.7656	7228.2032	1.75305	0.96348	565.292	0.00925	0.07027	20.0175	789.401	0.85872	183
16.4457	14	811.524	0.002436641	0.1474	1061.28	208.1	1.97739	12.0226	13570.5	92.9612	8365.2278	1.7544	0.96482	598.274	0.00891	0.07589	20.0175	789.401	0.85872	203.6
16.5801	15	823.791	0.002436641	0.1344	967.68	229.5	2.00728	12.9927	14521	109.764	9581.3716	1.75489	0.96603	630.644	0.0086	0.08152	20.0175	789.401	0.85872	229.5

Kurva J-R dapat diplot ketika harga Δa telah diperoleh. Plot kurva J-R pada zona Las, HTHAZ, LTHAZ dan uBM ditampilkan secara berurutan pada Gambar 5.46 sampai dengan Gambar 5.49. Sesuai prosedur ASTM E 1820 Harga *fracture resistance* J_{IC} diperoleh dengan cara menarik proyeksi dari perpotongan antara garis regresi dengan garis offset 0.2 mm ke sumbu ordinat J.

Pada kurva J-R zona fusi dalam Gambar 5.46 terlihat nilai *fracture resistance* kritis (J_{IC}) cukup tinggi yaitu sekitar 240 kJ/m^2 . Nilai *fracture resistance* kritis zona HTHAZ dalam Gambar 5.47 sekitar 105 kJ/m^2 .

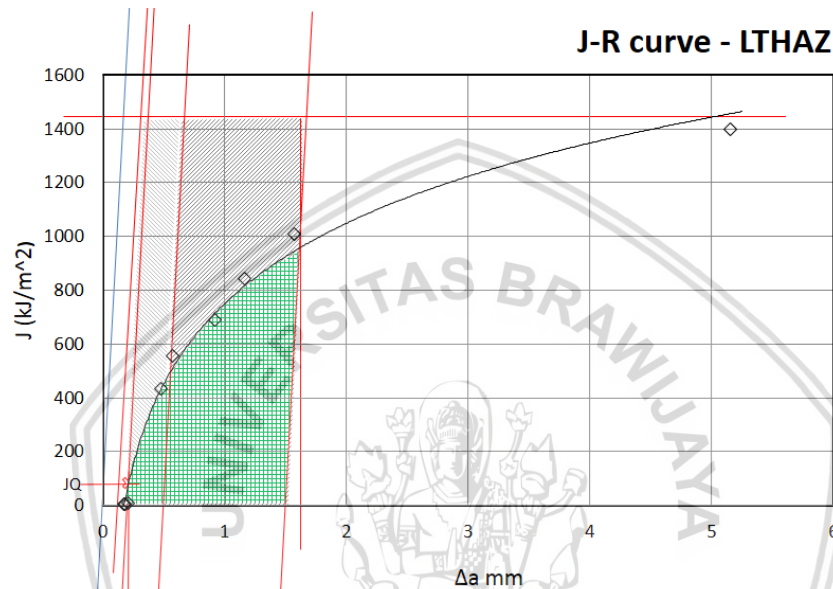


Gambar 5.46. Kurva J-R pada Zona Fusi

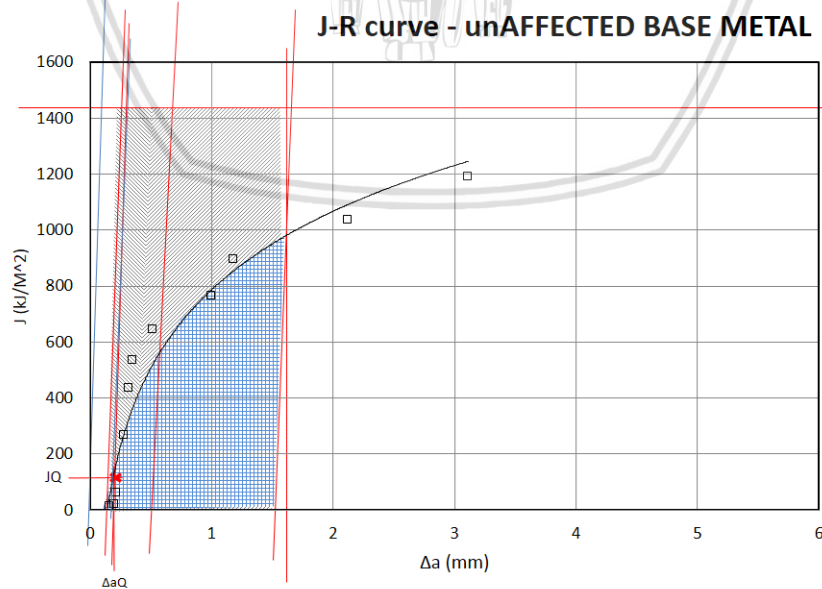


Gambar 5.47. Kurva J-R pada Zona HTHAZ

Pada kurva J-R Gambar 5.48 terlihat harga *fracture resistance kritis* (JIC) zona LTHAZ sekitar 55 kJ/m². Harga *fracture resistance kritis* ini terendah dibandingkan ketiga zona lainnya. Pada zona UBM dalam Gambar 5.49 nilai *fracture resistance kritis* sekitar 115 kJ/m².



Gambar 5.48. Kurva J-R pada Zona LTHAZ



Gambar 5.49. Kurva J-R pada Zona UBM

Harga *Fracture Resistance* kritis J_{IC} yang diperoleh secara grafis pada masing-masing zona ditampilkan dalam Tabel 5.6 berikut ini:

Tabel 5.7. *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) Hasil Pengujian Laboratorium

	FZ	HTHAZ	LTHAZ	uBM
<i>Fracture Resistance</i> (J_{IC})	240	105	55	115

5.6. Pembahasan *Fracture Resistance*

Prediksi harga K_{IC} dan J_{IC} di hitung dengan persamaan yang telah dirumuskan pada persamaan (3.28) sampai dengan persamaan (3.56). Hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 5.7 di bawah ini.

Tabel 5.8 Prediksi harga *Fracture Toughness* kritis (K_{IC})
dan *Fracture Resistance* kritis (J_{IC})

Hubungan K_{IC} - CVN	K_{IC}				J_{IC}			
	FZ	HTHAZ	LTHAZ	uBM	FZ	HTHAZ	LTHAZ	uBM
Rolfe – Novak - Barson	176.68	154.62	116.74	119.94	156.07	119.54	68.15	71.93
WRC 265	161.52	141.15	106.07	109.04	130.44	99.61	56.25	59.44
Robert & Newton	177.58	155.41	117.35	120.57	157.67	120.77	68.86	72.68
Sailors and Corten	220.94	193.66	146.87	150.81	244.07	187.47	107.86	113.72
Marander and Sanz	287.52	251.99	191.14	196.26	413.34	317.49	182.66	192.59
INSTA	181.59	158.74	120.72	123.95	164.88	126	72.86	76.82

Harga *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) hasil pengujian pada zona fusi sebesar 240 kJ/m² dan zona uBM sebesar 115 kJ/m² yang ditampilkan dalam Tabel 5.6 menunjukkan kesesuaian dengan harga prediksi *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) yang diperoleh menggunakan kaidah keseimbangan energi pada setiap zona dan pendekatan hubungan K_{IC} – CVN Sailors and Corten sebesar 244.07 kJ/m² dan 113.72 kJ/m² seperti ditunjukkan dalam Tabel 5.7. Berdasar hal tersebut persamaan semi empirik prediksi *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) Baja AISI 304 zona fusi dan zona *unaffected base metal* yang memberikan hasil paling sesuai dengan pengujian laboratorium secara berurutan dapat didefinisikan sebagai berikut :

Zona Fusi

$$J_{IC} = \frac{(14.6 (Emi - ((\int_0^{r1} \frac{Q}{2\pi r r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2})) - (\Delta HT1 + \int_{T1}^{T2} C_p dT)))^{0.50})^2}{E} \quad (5.15)$$

Zona uBM

$$J_{IC} = \frac{(14.6 (Emi - ((\int_{r3}^{r4} \frac{Q}{2\pi r r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2})) - \frac{\sigma_{TS}^2}{2E})))^{0.50})^2}{E} \quad (5.16)$$

Berbeda dengan kedua zona di atas, prediksi *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) dalam Tabel 5.7 pada zona HTHAZ dan LTHAZ dengan pendekatan hubungan K_{IC} – J_{IC} WRC 265 menunjukkan kesesuaian yang lebih baik terhadap hasil pengujian laboratorium dalam tabel 5.7 dibandingkan dengan pendekatan hubungan K_{IC} – J_{IC} lainnya. Harga prediksi *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) pada zona HTHAZ sebesar 99.61 kJ/m² sangat dekat dengan harga *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) hasil pengujian sebesar 105 kJ/m². Pada zona LTHAZ prediksi harga *Fracture Resistance* kritis (J_{IC}) adalah: 56.25 kJ/m² yang juga sangat dekat dengan hasil pengujian sebesar 55 kJ/m². Persamaan semi empirik prediksi *Fracture Resistance* J_{IC} Baja AISI 304 zona HTHAZ dan zona LTHAZ yang memberikan hasil paling sesuai dengan pengujian laboratorium adalah sebagai berikut :

Zona HTHAZ

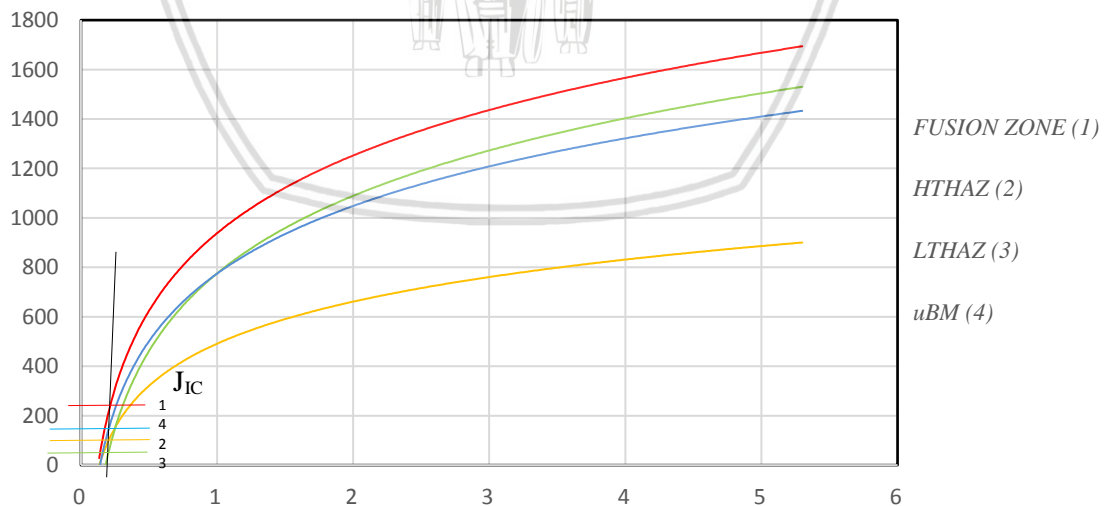
$$J_{IC} = \frac{\left(\sqrt{0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r l^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r l^2}\right) - \left(\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{TS}^2}{2E}\right)\right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \cdot \sigma_{ys}} \right)^2}{E} \quad (5-17)$$

Zona LTHAZ

$$J_{IC} = \frac{\left(\sqrt{0.54 \left(\frac{Emi - \left(\int_{r1}^{r2} \frac{Q}{2\pi r l^2} \exp\left(\frac{r^2}{2r l^2}\right) - \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{TS}^2}{2E}\right)\right)}{\sigma_{ys}} - 0.02 \right) \cdot \sigma_{ys}} \right)^2}{E} \quad (5-18)$$

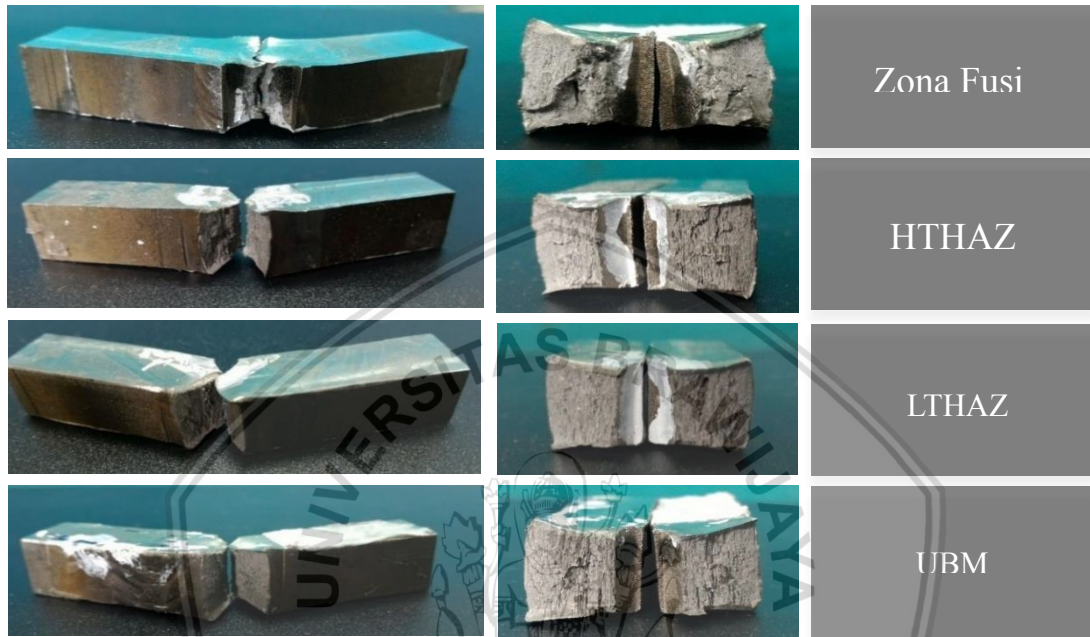
Prediksi harga *Fracture Resistance* kritis J_{IC} di atas menempatkan zona fusi memiliki harga ketangguhan retak tertinggi kemudian disusul secara berurutan oleh zona HTHAZ, zona uBM dan zona LTHAZ. Urutan ketangguhan material ulet ini tampak jelas terlihat pada grafik superposisi kurva J-R pada semua zona pengelasan yang ditampilkan pada Gambar 5.50

J-R CURVE - WELDING ZONES SUPERPOSITION

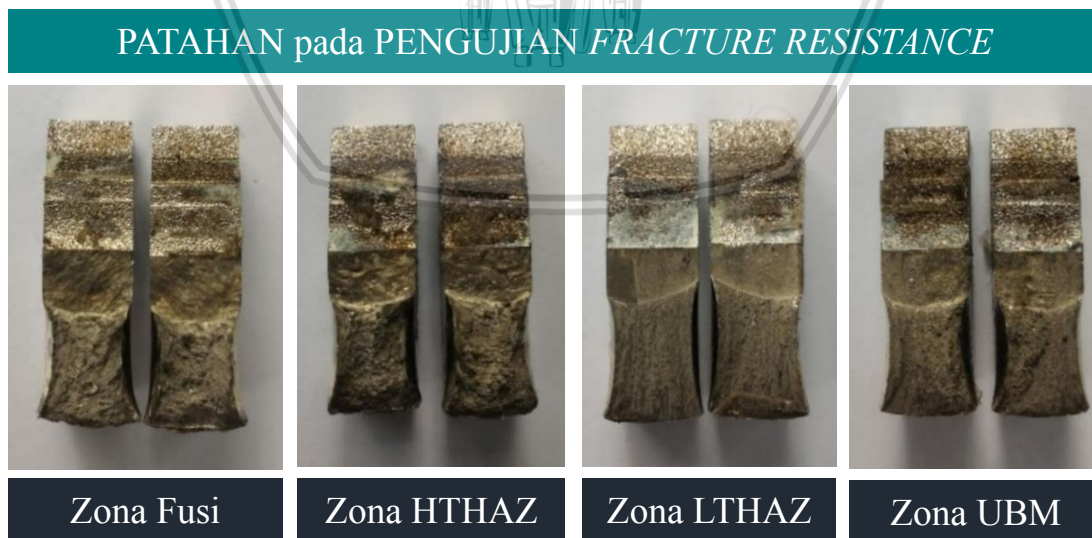


Gambar 5.50. Superposisi Kurva J-R pada Semua Zona Pengelasan

Hasil ini juga didukung oleh hasil foto makro patahan specimen uji impak pada Gambar 5.51. dan patahan specimen uji *fracture resistance*. Foto makro menunjukkan bentuk patahan ulet pada zona-zona dengan harga ketangguhan material tinggi dan bentuk patahan getas pada harga ketangguhan material lebih rendah.

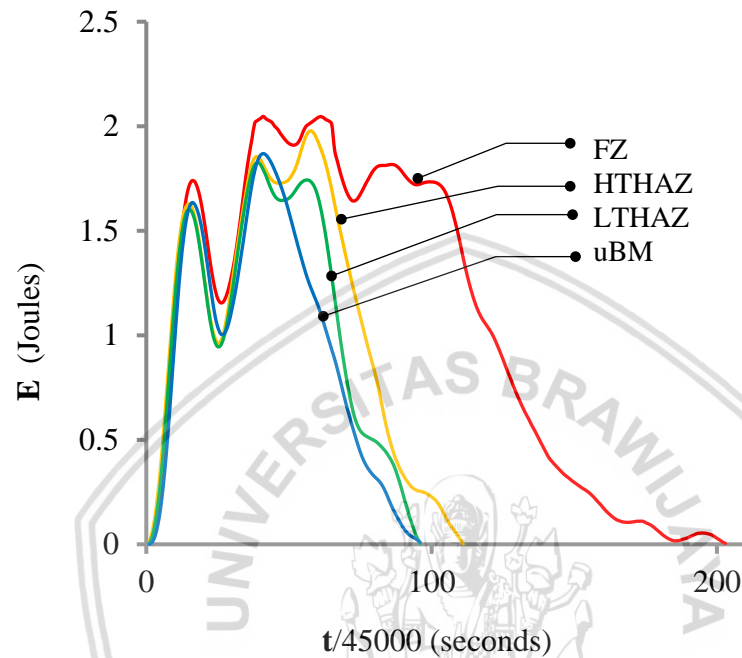


Gambar 5.51. Bentuk patahan specimen uji impak



Gambar 5.52. Patahan pada Pengujian *Fracture Resistance*

Hasil pengujian impak dengan data akuisisi kecepatan tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.52 juga menunjukkan kesesuaian urutan kemampuan kritis material menyerap energi sebelum terjadinya kegagalan yang direpresentasi oleh ketinggian puncak kurva penyerapan energi masing-masing zona.



Gambar 5.53. Superposisi Penyerapan Energi pada Pengujian Impak

Seperti di uraikan dalam paragraf terdahulu variasi penyerapan energi pada keempat zona dipengaruhi oleh *interstisial solid* dan kehadiran presipitat dalam pengelasan *austenitic steel*. Harga *fracture resistance* sangat erat kaitannya dengan kehadiran chromium interstisial solute yang bertanggung jawab terhadap kekuatan material. Kekuatan material ditentukan oleh kemampuannya menahan dislokasi. Dislokasi membangkitkan tegangan yang akan berinteraksi dengan tegangan lokal akibat kehadiran *chrom* sebagai *solute atom*. Ketika dislokasi tertahan diperlukan tegangan geser yang lebih besar untuk menggerakkannya. Hal ini mengakibatkan peningkatan tegangan *yield* yang berarti kekuatan material meningkat. Penguatan *solid solution* dipengaruhi oleh konsentrasi *solute atom*, modulus *solute atom*, ukuran dan valensi *solute atom* serta *symmetry medan solute* (Dieter, 1986; Joshua, 2013).

Presipitat memiliki peran penting dalam penguatan paduan, biasa disebut *precipitate hardening* (22,23). Partikel precipitat berperan sebagai penahan dislokasi melalui beberapa cara. Bila ukuran precipitate kecil, dislokasi akan memotong presipitat akibatnya particle-matrix interfacial energy meningkat. Jika ukuran partikel presipitat lebih besar (> 60 nm), dislokasi akan cenderung memutar mengelilingi partikel. Presipitat berukuran kecil (< 0.05 μm) dan sedang ($0.05\text{--}0.5$ μm) berkontribusi terhadap penguatan material *stainless steel* dengan cara memperbaiki kekerasan dan kekuatan *yield*. Partikel yang berukuran terlalu besar akan mudah berubah menjadi *void nucleation site* atau retak (Callister, 2004; Thomas, 2005).

Partikel presipitat yang teridentifikasi pada penelitian ini berukuran 0.5 μm . Ukuran partikel ini sesuai dengan hasil penelitian terdahulu yang mengungkap ukuran partikel presipitat *chromium carbide* berkisar : 0.5 μm – 1.5 μm (Gharehbaghi, 2012)



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Neraca kesetimbangan energi $E_{mi} = E_{mw} + (Q_{wi} - W_{wo})$ menjadi dasar bagi perumusan persamaan yang dapat digunakan untuk memprediksi harga ketangguhan retak kritis K_{IC} dan *fracture resistance* kritis J_{IC} pada setiap zona pengelasan baja AISI 304
2. Menggunakan pendekatan keseimbangan energi pengelasan pada setiap zona dan berbagai hubungan $K_{IC} - CVN$, telah berhasil dirumuskan persamaan untuk memprediksi harga ketangguhan retak material kritis K_{IC} yang menghasilkan prediksi *fracture resistance* kritis J_{IC} sesuai dengan hasil pengujian laboratorium.
 - Harga *fracture resistance* kritis J_{IC} baja AISI 304 di daerah sambungan las pada setiap zona dapat diprediksi menggunakan persamaan sebagai berikut :

Zona Fusi

$$J_{IC} = \frac{(14.6 (E_{mi} - ((\int_0^{r_1} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\Delta HT1 + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT))))^{0.50})^2}{E}$$

Zona HTHAZ

$$J_{IC} = \frac{\sqrt{E_{mi} - ((\int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{3\gamma}{D} + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))}}{(0.54(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ys}} - 0.02)) \cdot \sigma_{ys}})^2}{E}$$

Zona LTHAZ

$$J_{IC} = \frac{\sqrt{E_{mi} - ((\int_{r_2}^{r_3} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - (\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + 10.98 + \frac{\sigma_{rs}^2}{2E})))}}{(0.54(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ys}} - 0.02)) \cdot \sigma_{ys}})^2}{E}$$

Zona uBM

$$J_{IC} = \frac{(14.6 (E_{mi} - ((\int_{r_3}^{r_4} \frac{Q}{2\pi r'^2} \exp(\frac{r^2}{2r'^2}) - \frac{\sigma_{rs}^2}{2E}))))^{0.50})^2}{E}$$

- Hasil prediksi harga *fracture resistance* kritis (J_{IC}) pada zona fusi, HTHAZ, LTHAZ dan uBM pada kurva J-R secara berurutan adalah : 240 kJ/m², 105 kJ/m², 55 kJ/m², 115 kJ/m²
- Harga *fracture resistance* kritis (J_{IC}) Hasil pengujian laboratorium menggunakan standar pengujian ASTM E 1820 pada zona fusi, HTHAZ, LTHAZ dan uBM secara berurutan adalah : 244.07 kJ/m², 99.61 kJ/m², 56.25 kJ/m², 113.72 kJ/m²
- Prediksi *fracture resistance* didukung oleh hasil foto makro patahan yang menunjukkan bentuk patahan ulet pada zona Fusi dan bentuk patahan lebih getas pada tiga zona lainnya dengan harga ketangguhan retak yang lebih rendah.
- Pada pengujian impak menggunakan perangkat data akuisisi kecepatan tinggi teridentifikasi *negatif overshoot* pada semua zona yang mengindikasikan atom Ni sebagai *interstisial solute* yang menghambat dislokasi lebih lanjut. Grafik pengujian impak juga menunjukkan variasi cacah puncak pada masing-masing zona yang mengindikasikan kehadiran precipitat karbida krom pada zona Fusi, zona HTHAZ dan zona LTHAZ. Precipitat dominan ini muncul pada peristiwa sensitisasi saat pengelasan *Stainless Steel*. Precipitat karbida krom teridentifikasi pada pengamatan dan pemetaan menggunakan Scanning Electron Microscope

SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian untuk menguji persamaan prediksi ketangguhan retak kritis K_{IC} dan persamaan *fracture resistance* kritis J_{IC} pada pengelasan jenis material lainnya
2. Profil penyerapan energi pada pengujian impak dengan perangkat data akuisisi kecepatan tinggi menurut penelitian terdahulu dapat digunakan untuk mendapatkan J-R curve. Harga *Fracture resistance* yang diperoleh dapat digunakan sebagai pembanding hasil prediksi dari persamaan yang dirumuskan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexandra V. Khvan, Bengt Hallstedt, Christoph B., 2014, A thermodynamic evaluation of the Fe–Cr–C system, *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*.
- ASTM E 399 Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1990
- ASTM E23-02 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials
- ASTM E 813 Test Method for J_{Ic}, A Measure of Fracture Toughness
- ASTM E 1152 Test Method for Determining J-R Curves
- ASTM, E 1820–08, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Section III, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, 2008.
- ASTM E 1823 Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing
- ASTM STP 1380, Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, , pp. 337–353,.
- Australian Stainless Steel Development Association, 2012
- Barsom J.M., Rolfe, 1970, Correlation between K_{Ic} and Charpy V–notch test results in the transition temperature range, in: ASTM STP 466, pp. 281–302,
- Bojan A. Marinkovic et al., 2002, Thermodynamic Evaluation of Carbide Precipitates in 2.25Cr–1.0Mo Steel for Determination of Service Degradation
- Bhadeshia H. K. D. H. , Lecture 6: Solid–State Transformations, Part IB Materials Science & Metallurgy Course A, Metals and Alloys.
- Bhadeshia, H. K. D. H., 2001, Design of Ferritic Creep-Resistant Steels, *ISI International*, 41: 626–640.
- Bowman, A. L., Arnold, G. P., Storms, E. K. and Nereson, N. G., 1972, The Crystal Structure of Cr₂₃C₆, *Acta Cryst*, 28:3102.
- Buijs Eng. N.W, Van Leeuwen Stainless B.V. , Risks with the welding of Stainless Steel
- Callister, W.D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 2nd ed.; Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2004.
- Chaouadi R., 2004, An energy–based crack extension formulation for crack resistance characterization of ductile materials, *J Test Eval* 32, 469–475,
- Chaouadi R., Crack resistance determination from the load–displacement test record, SCK CEN Report R–3712, 2003.

- Chaouadi R., Puzzolante J.L., 2008, Loading rate effect on ductile crack resistance of steels using precracked Charpy specimens, *Int J Press Vess Piping* 85 752–761,
- Chaouadi R., Fabry A., 2002, On the utilization of the instrumented Charpy impact test for characterizing the flow and fracture behavior of reactor pressure vessel steels, in: D. François, A. Pineau (Eds.), *From Charpy to Present Impact Testing*, Elsevier, pp. 103–117.
- Chaouadi R., and Puzzolante J.L., 2000, Procedure to Estimate the Crack Resistance Curve from the Instrumented Charpy V–Notched Impact Test, SCK•CEN, Boeretang, 2400 Mol, Belgium.
- Chih-Chun Hsieh, 2014, Evolution of Microstructure and Residual Stress under Various Vibration Modes in 304 Stainless Steel Welds, DOI: 10.1155/2014/895790.
- Choi J., Mazumder J., 2002, Numerical and experimental analysis for solidification and residual stress in the GMAW process for AISI 304 Stainless Steel, *Journal of materials science* 37, 2143 – 2158.
- Coelho R.S., Kostka A., Pinto H., Rothkirch A., Dos Santos J., and Pyzalla A.R.. 2009. Microstructure and residual stress formation in an aa6040 to az31b friction stir weld, JCPDS-International Centre for Diffraction Data ISSN 1097-0002.
- Colangelo, V.J. Heiser, F.A., 1987. *Analysis of Metallurgical Failures*, 2nd Edition. V. ISBN: 978-0-471-89168-0. 368 pages. February 1987. John Willey and Sons , Singapore.
- Dalle Donne, 2001. Investigations on Residual Stresses in Friction Stir Welds 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27 and 28 2001 September. TWI (UK).
- Dieter, G.E. *Mechanical Metallurgy*; McGraw-Hill Publishing Company: New York, NY, USA, 1986.
- Du Toit M., Van Rooyen G.T., and Smith D., 2012. An Overview of the Heat-Affected Zone Sensitization and Stress Corrosion Cracking Behaviour of 12% Chromium Type 1.4003 Ferritic Stainless Steel., IIW Doc IX-2213-06 , IIW Doc IX-H-640-06
- David Broek, 1978, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. 2nd revised edition , Sýthoff and Noordhoff.
- David Broek, 1986, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. 4th revised edition Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- David Broek, 1988. *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Emily, C. Cormack, 2012. *The effect of sensitization on the stress corrosion cracking of aluminum alloy 5456*. Thesis. Naval Postgraduate School Monterey. California.
- Eshelby, J.D., 1956. *The Continuum Theory of Lattice Defects*. Solid State Physics, vol. III, eds. Seitz, F. and Turnbull, D., Academic Press.
- Fabry, A., van Walle, E., Chaouadi, R., Wannijn, J.P., Verstrepen, A., Puzzolante, J.L., van Ransbeeck, T., Van de Velde, J., 1993, *RPV Steel Embrittlement – Damage Modeling and Micromechanics*, SCK-CEN Report BLG-649.
- Fabry A., E., van Walle E, J. Van de Velde, Chaouadi, R., Puzzolante, J.L., van Ransbeeck, T., Verstrepen, A., 1996, *On the Use of the Instrumented Charpy V Impact Signal for Assessment of RPVS Embrittlement*, in: van Walle E (Ed.) *Evaluating Material Properties by Dynamic Testing*ESIS Publication 20, pp. 59–78.
- Francfort, G.A., Marigo J-J., 1998. *Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem*. J Mech Phys Solids; 46(8):1319–42.
- Fujita, N. *Modelling Carbide Precipitation in Alloy Steels*. Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK, February 2000.
- Gharehbaghi, A. *Precipitation Study in a High Temperature Austenitic Stainless Steel Using Low Voltage Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*. Master's Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, March 2012
- Gioielli P.C., Landes J.D., Paris H., Tada, L. Loushin, 2000, *Method for predicting J–R curves from Charpy impact energy*, in: P.C. Paris, K.L. Jerina(Eds.) *Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume*, ASTM STP 1360, pp.61–68
- Girish, P. Kelkar, Ph.D., 2008, *Weld Cracks*, WJM Technologies.
- Gooch T.G., and Willingham D.C., 1971. *Weld Decay in AISI 304 Stainless Steel*. Met. Const. British Welding Journal, Vol 3(10). p. 366.
- Goldschmidt, 1948. J. Iron Steel Inst., 160 345.
- Gordon J.E., 1988. *The Science of Structures and Materials*, Scientific American Library.
- Guillermet, A. F. and Grimvall, G., J. 1992, Phys. Chem. Solids, 53:105.
- Henriksson, K. O. E., Sandberg, N. and Wallenius, J., 2008, *Carbides in Stainless Steels: Results from ab initio investigations*, Applied Physics Letters, 93:191912,.

Henrik Sieurin, 2006, Fracture toughness properties of duplex Stainless Steels, Doctoral Thesis , Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology ISBN 91-7178-354-7 , Stockholm.

Hutchinson, 1968, J.W., Singular Behaviour at the end of a tensile crack in hardening material, J.Mech. Phys. Solids, 16, pp. 13-31

Iacobescu, G., 2006, A theoretical model for welding process with gaussian heat source - part. 1, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 68, No. 4.

ISF - The Welding and Joining Institute of the RWTH Aachen University, 2002, Residual Stresses, Aachen.

Jiang, C., First-principles study of structural, elastic, and electronic properties of chromium carbides, Applied Physics Letters, 92:041909, 2008.

Jianqiang Chen, Yves Verreman, Jacques Lantaigne, 2013, On fracture toughness JIC testing of martensitic Stainless Steels, 13th International Conference on Fracture June 16–21, Beijing, China.

Joshua, P. Mechanical Properties of Materials; Springer: New York, NY, USA, 2013; pp. 236–239; ISBN 978-94-007-4341-0.

Karel Chobot, Martin Kraus, 2013, Assessment of energy dissipation at initiation moment of fracture process of low – carbon steel, Metal, 15. - 17. 5., Brno, Czech Republic, EU

Kleykamp, H., J. 2001, Alloys Compd., 321:138.

Klingbeil, N.W. A total dissipated energy theory of fatigue crack growth in ductile solids, 2003, International Journal of Fatigue 25 117–128.

Lenkey, G.B., Toth L., 2001, Measurement techniques for determination of ductile crack initiation on Charpy specimens, Materialwiss Werkstofftech 32, 562–567.

Internet <http://chemsoc.velp.info/alloys.php?elementno=24>

Lecture material Indian Institute of Technology Bombay

Louise Greeff, 2006, The Influence of Welding Parameters on the Sensitisation Behaviour of 3Cr12, Faculty of Engineering University of Pretoria, Pretoria.

Michael F. McGuire, 2008. Stainless Steels for Design Engineers. ASM International, ISBN-10: 0871707179 ISBN-13: 978-0871707178.

Minami Y., H. Kimura, Y. Ihara, Mater. Sci. Technol. 2 (1986) 795–806

Meinhardt, D. and Krisement, O., 1962, Arch. Eisenhuettenwes, 33:493

- Mohd Shukor Salleh, Mohd Irman Ramli, Saifudin Hafiz Yahaya, 2011, Study On Mechanical Properties and Microstructure Analysis Of Aisi 304l Stainless Steel Weldments, Journal of Mechanical Engineering and Technology, ISSN: 2180-1053 Vol. 3 No. 2.
- Metline industries, 2014
- Nageswara Rao B., Acharya A.R., 1992, A computer study on evaluation of fracture toughness from Charpy V-notch impact energy and reduction of area, Eng Frac Mech 41, 85–90,
- Niles R.W. and Jackson C.E., 1975, Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process.
- Pandey K.N., Chand S., An energy based fatigue crack growth model, International Journal of Fatigue 25 (2003) 771–778.
- Philibert, G. Henry, M. Robert and J. Plateau : 1961. Mem. Sci. Rev. Metall. 58 . 557.
- Pisarski, G., 1978, A review of correlations relating Charpy energy to K_{Ic}, The Welding Inst Res Bulletin, 12 , 362–367,.
- Polukhin P, 1977. Metal Processes Engineering, Peace Publisher. Moscow.
- Ranjbarnodeh, E., 2012. Finite Element Simulation of Carbide Precipitation in Austenitic Stainless Steel 304, International Journal of Mechanics and Applications p-ISSN: 2165-9281 e-ISSN: 2165-9303 2012; 2(6): 117-123 .
- Rice, 1968., A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, Journal of Applied Mechanics, vol. 35, pp. 379-386.
- Robson, J. D. and Bhadeshia, H. K. D. H., Modelling precipitation sequences in power plant steels, Materials Science and Technology, 13:631, 1997.
- Rice, J.R., and Rosengren. G.F., 1968, Plane strain deformation near a crack tip in a power law hardening material, J.Mech.Phys.Solids, 16, pp. 1-12
- Read, D. T., McHenry, H. I., Steinmeyer, P. A., and Thomas, Jr., R. D., 1980, , "Metallurgical Factors Affecting the Toughness of 316L SMA Weldments at Cryogenic Temperatures," *Welding Journal*, 59(4),. Research Suppl., pp. 104-s to 113-s
- Rolfe S.T., Barsom J.M., 1977, Fracture and Fatigue Control in Structure –Application of Fracture Mechanics, Prentice–Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,
- Rolfe S.T., Novak S.R., 1970, Slow–bend K_{Ic} testing of medium–strength high toughness steels, in: Review of Development in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463, pp. 124–159.

- Schreurs P.J.G, 2012, Fracture Mechanics Lecture notes - course 4A780, Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering Materials Technology
- Song You Young , 2010, Thermodynamic Study on B and Fe Substituted Cr₂₃C₆ Using First-Principles Calculations, Master Thesis, Computational Metallurgy Graduate Institute of Ferrous Technology Pohang University of Science and Technology.
- Sandberg, N., Henriksson, K. O. E. and Wallenius, J., 2008, Carbon impurity dissolution and migration in bcc Fe-Cr: First-principles calculations, *Physical Review B*, 78:094110.
- Santos, A. V., 2007, Comparative study between LMTO and FLAPW into the calculation of the electronic structure of carbide Cr₂₃C₆, *Physica B*, 387:136-142.
- Samson, S., 1964., *The Structure of Metals and Intermetallic Compounds* Sept. 1, 1953-Aug. 31, Final Report, ONR Contract Nonr-220-33. (California Institute of Technology, Pasadena).
- Schindler H.J., 2000, Relation between fracture toughness and Charpy fracture energy: an analytical approach, in: T.A. Siewert, M.P. Manahan (Eds.),
- Steel and Metals Market Research, 2012, All Stainless Steel Finished Product,
- Subodh Kumar, Shahi A.S., 2011, Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 Stainless Steel joints, *Materials and Design* 32, 3617-3623
- Steve Kane, 1992, Fracture Toughness Requirements for RHIC Cryogenic Design, RHIC Project, Brookhaven National Laboratory
- Sensitisation Behaviour, University of Pretoria, Pretoria.
- Sourmail T, Bhadesia H.K.D.H, 2003, Modelling simultaneous precipitation reactions in Austenitic Stainless Steels, *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 27 (2003) 169–175 Elsevier Journal.
- Sourmail T., and Bhadeshia H. K. D. H, 2003, Sensitisation and Evolution of Chromium-depleted Zones in Fe–Cr–Ni–C Systems, *ISIJ International*, Vol. 43 (2003), No. 11, pp. 1814–1820
- Terán, G., Capula-Colindres S., Angeles-Herrera D., Velázquez J.C., Fernández-Cueto M. J., 2015, Estimation of fracture toughness K_{IC} from Charpy impact test data in T-welded Connections Repaired by Grinding and Wet, *Engineering Fracture Mechanics*, 153 (2016) 351–359, Elsevier, Mexico.

- Thomas, H.C. Mechanical Behavior of Materials, 2nd ed.; Waveland Press, Inc.: Long Grove, IL, USA, 2005.
- Thompson, C.V. ,1990 Grain growth in thin films. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 20, 245-268.
- Tsai N.S dan Eagar T.W., 1984, The Size of the Sensitization Zone in 304 Stainless Steel Weld, *J Materials for Energy Systems*, Vol 6 no.1
- Tada, H.; Paris, P.C.; Irwin, G.R. , 1973, The stress analysis of cracks handbook. Del Research,
- Tada, H.; Paris, P.C.; Irwin, G.R. 1985, The stress analysis of cracks handbook; 2nd Ed. Paris Productions, Inc., St. Louis,.
- Underwood J. h., Leger G.S., Fracture Toughness of High Strength Steel Predicted from Charpy Energy or Reduction-in-area, Technical report arlcb-tr-82030, us army armament research and development command large caliber weapon systems laboratory benet weapons laboratory ll watervliet n.y. 12189
- Van Zwieten, 1993, The Influence of Interstitial Solute Level on the Charpy Toughness Properties of a 40% Cr-Fe Stainless Steel, *J. Pres. Ves. & Piping* 56 (1993) 69-91.
- Viehrig H.W., Boehmert J., Richter H., Valo M., 2000, Use of instrumented Charpy test for determination of crack initiation toughness, in: T.A. Siewert, M.P. Manahan (Eds.) *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress*, ASTM STP 1380, pp. 354–365,
- Wallin K., 2001, Low cost J–R curve estimation based on CVN upper shelf energy, *Fat Frac Eng Mat Struc* 24 , 537–549.
- Whipple T. A., Mc Henry H.I. and Read D. T., 1980, Fracture Behavior of Ferrite-Free Stainless Steel Welds in Liquid Helium. 61st AWS Annual Meeting held in Los Angeles, California
- William D. Callister, Jr., 2003, *Materials Science and Engineering an Introduction*, John Wiley and Sons, Inc.
- Xie, J., Shen, J., Chen, N. and Seetharaman, S., 2006, Site preference and mechanical properties of Cr_{23-x}TxC₆ and Fe₂₁T₂C₆ (T = Mo, W), *Acta Materialia*, 54:4653-4658,.
- Yi Ding, 2009, Effects of elevated temperature exposure on the microstructural evolution of Ni(Cr)-Cr₃C₂ coated 304 Stainless Steel, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Nottingham.
- Yakel, H. L., 1987, Atom Distributions in Tau-Carbide Phases: Fe and Cr Distributions in (Cr_{23-x}Fe_x)C₆ with x=0, 0.74, 4.13 and 7.36, *Acta Cryst.*, 43:230.

- Young, S.Y. Thermodynamic Study on B and Fe Substituted Cr₂₃C₆ Using First-Principles Calculations. Master's Thesis, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea, 15 April 2010.
- Yves Wadier, Hoai Nam Le, Renaud Bargellini, 2013. An energy approach to predict cleavage fracture, under non-proportional loading. Engineering Fracture Mechanics 97. 30–51.

